

VŠB-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Testovací zařízení pro měření valivého odporu

Testing Device for Measuring Rolling
Resistance

Student: David Krčmář

Osobní číslo: KRC0066

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Trochta, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **David Krčmář**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R010 Konstrukce strojů a zařízení
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Testovací zařízení pro měření valivého odporu**
Testing Device for Measuring Rolling Resistance
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhněte zařízení pro měření valivého odporu kol průmyslových vozíků. Zařízení musí splňovat následující požadavky:

- Měření do rychlosti 0,5 m/s.
- Zatížení měřeného kola simulující max. nosnost vozíků 1500 kg.
- Možnost měření kol různých velikostí a konstrukcí (pevná, otočná,...).

Proveďte následující kroky:

1. Zpracujte přehled průmyslových kol od různých výrobců společně s informacemi o jejich valivém odporu.
2. Navrhněte konstrukci měřicího zařízení splňující výše zmíněné požadavky.
3. Navrhněte metodiku vyhodnocení valivého odporu na základě zvolené konstrukce měřicího zařízení.
4. Proveďte pevnostní výpočty kritických částí.
5. Zhotovte výrobní dokumentaci v rozsahu podle pokynů vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

BOLEK, A., KOCHMAN, J. AKOL.: *Části strojů I*. Praha: SNTL, 1989. 776 s. ISBN 80-03-0046-7.
KALÁB, K.: *Části a mechanismy strojů pro bakaláře. Části spojovací*. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2007. 91 s. ISBN 978-80 248-1290-8.
MORAVEC, V., HAVLÍK, J.: *Výpočty a konstrukce strojních dílů*. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2008. 72 s. ISBN 978-80-248-0878-9.
SHIGLEY, J., E., MISCHKE CH., R., BUDYNAS R., G.: *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. 1186 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Trochta, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Zdeněk Foltá, Ph.D.
vedoucí katedry



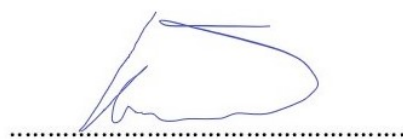
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V práci jsem použil interní údaje o simulačním modelu pro početní určení valivých odporů pojezdových kol průmyslových vozíků [2] získaných od firmy SSI Schäfer, s.r.o., Hranice na Moravě, firma s jejich zveřejněním souhlasí.

V Ostravě dne 18. května 2020.

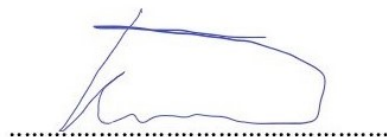


Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: David Krčmář

Adresa trvalého pobytu autora práce: Hranice, Pod Křivým 1240, 753 01

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KRČMÁŘ, D. *Testovací zařízení pro měření valivého odporu*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2020, 58 s. Vedoucí práce: Trochta, M.

Bakalářská práce se zabývá optimálním řešením testovacího zařízení pro měření valivého odporu. V úvodu jsou vyjmenovány základní informace o valivém odporu, stručný přehled průmyslových kol od výrobců a metody měření. Cílem je správná volba konstrukčního návrhu testovacího zařízení, s optimálním řešením všech jeho prvků. Navržené testovací zařízení bude na základě měření schopno stanovit hodnoty valivých odporů kol pro konkrétní podmínky měření. Dále je testovací zařízení pevnostně zkontrolováno, zda testovací zařízení vydrží nosnost břemene v různých režimech. Součástí této práce je taktéž výkresová dokumentace v plném rozsahu.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KRČMÁŘ, D. *Testing device for measuring rolling resistance*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2020, 58 p. Thesis head: Trochta, M.

Bachelor thesis is dealing with optimal solution of testing device for measuring rolling resistance. The introduction is list of basic information about rolling resistance, a brief overview of industrial wheels from manufacturers and measurement methods. Object of this determination is to chose best construction design of testing device, with optimal solution of all its parts. The designed testing device will be based on measuring able to determine the value of the rolling resistance for specific measurement conditions. Furthermore the testing device is strength-checked to see if the testing device can withstand the load capacity of the load in different modes. This thesis also contains drawing documentation in full extent.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
1. Úvod	10
1.1. Stanovené cíle práce.....	11
2. Valivý odpor.....	12
2.1. Statický valivý odpor.....	13
2.2. Dynamický valivý odpor	13
2.3. Průmyslová kolečka ve firmě SSI Schäfer, s.r.o.	14
2.4. Průmyslová kola od TENTE	14
2.5. Průmyslová kola od Blickle	17
3. Metody měření valivého odporu	19
3.1. Metoda měření siloměrem při tažení vozíku	19
3.2. Metoda dojezdu vozíku	20
3.3. Metoda měření valivého odporu při rozjezdu	21
3.4. Výběr metodiky měřícího zařízení	22
4. Návrh konstrukce testovacího zařízení	23
4.1. Popis testovacího zařízení	23
4.2. Návrhový výpočet hlavního nosného profilu	25
5. Metodika pro vyhodnocení experimentálního měření valivého odporu.....	29
5.1. Popis měření.....	29
5.2. Zpracování experimentálních dat	30
5.3. Matematický model a simulace	31
6. Pevnostní výpočet.....	35
6.1. Popis použitého softwaru	35
6.2. Popis numerického modelu	35
6.3. Parametry výpočtu	42
6.4. Výsledky.....	47
7. Závěr	56
8. Seznam použité literatury.....	58
9. Seznam příloh	59

Seznam použitých značek a symbolů

M	Moment	[N·m]
F_V	Velikost valivého odporu	[N]
F_N	Velikost normálové síly	[N]
r	Poloměr	[mm]
ξ	Rameno valivého odporu	[mm]
n	Celková délka úseček styčné oblasti	[mm]
c	Délka úsečky styčné oblasti	[mm]
e	Délka úsečky styčné oblasti	[mm]
f	Délka úsečky styčné oblasti	[mm]
G	Velikost zatěžující síly	[N]
m	Hmotnost břemene	[kg]
g	Gravitační konstanta	[N/kg]
Q_{kz}	Svislé proměnlivé spojité zatížení	[kN ·m ⁻¹]
Q_{kxy}	Vodorovné proměnlivé spojité zatížení proti směru os x a y	[kN ·m ⁻¹]
Q_{kx}	Vodorovné proměnlivé spojité zatížení ve směru osy x	[kN ·m ⁻¹]
$F_{\check{c}l}$	Síla člověka	[N]
d	Délka prutu madla	[mm]
k	Součinitel bezpečnosti pro pruty	[-]
k	Součinitel bezpečnosti pro plochy	[-]
R_e	Mez kluzu materiálu	[MPa]
σ_{max}	Maximální napětí pro pruty	[MPa]
σ_{max}	Maximální napětí pro plochy	[MPa]
l	Délka prutu hlavního nosníku	[mm]
a	Vzdálenost konce nosného profilu po kloubovou podpěru	[mm]
b	Vzdálenost mezi kloubovými podpěrami	[mm]
F_x	Síly v ose x na nosném profilu	[N]
F_z	Síly v ose z na nosném profilu	[N]
R_{Az}	Reakce v bodě A na nosném profilu	[N]
R_{Bz}	Reakce v bodě B na nosném profilu	[N]

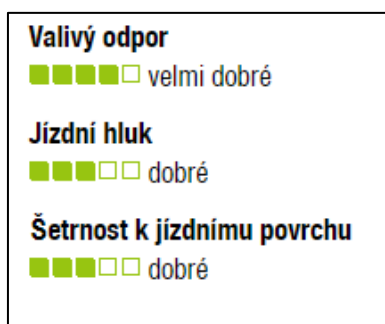
T	Posouvající síla	[N]
M_o	Ohybový moment	[N·m]
M_{oA}	Ohybový moment v bodě A	[N·m]
M_{oB}	Ohybový moment v bodě B	[N·m]
$M_{o1,2,3}$	Ohybové momenty ve vybraných bodech	[N·m]
M_{omax}	Maximální ohybový moment	[N·m]
σ_{omax}	Maximální ohybové napětí	[MPa]
σ_{oDOV}	Dovolené ohybové napětí	[MPa]
W_o	Průřezový modul v ohybu	[mm ³]
W_{omin}	Minimální průřezový modul v ohybu	[mm ³]

1. Úvod

Téma bakalářské práce bylo zpracováno ve firmě SSI Schäfer, s.r.o. V tomto výrobním závodě v Hranicích na Moravě je nutné používat řadu manipulačních vozíků, většinou s ručním pohonem a za účelem splnění hygienických limitů pro zaměstnance, kteří tyto vozíky obsluhují. Je nutné znát, jak velké budou manipulační síly. Největší složkou manipulačních sil jsou valivé odpory kol. Určení valivého odporu je závislé na řadě parametrů a výrobci pojezdových kol pro průmyslové využití běžně tyto hodnoty neuvádí konkrétní čísla pouze grafické znázornění na stupnici viz (Obr. 1.1) a (Obr. 1.2). Z tohoto důvodu má smysl valivý odpor měřit. Za tímto účelem bylo nutné zvolit vhodnou metodiku měření a navrhnout adekvátní testovací zařízení.

Valivý odpor	+	+	+	+	+
Hlučnost pohybu	+	+	+	+	+
Opotřebení	+	+	+	+	+
Ochrana proti korozi	+	+	+	+	+

Obr. 1.1 – Znázornění valivého odporu firmou TENTE [6]



Obr. 1.2 - Znázornění valivého odporu firmou Blickle [7]

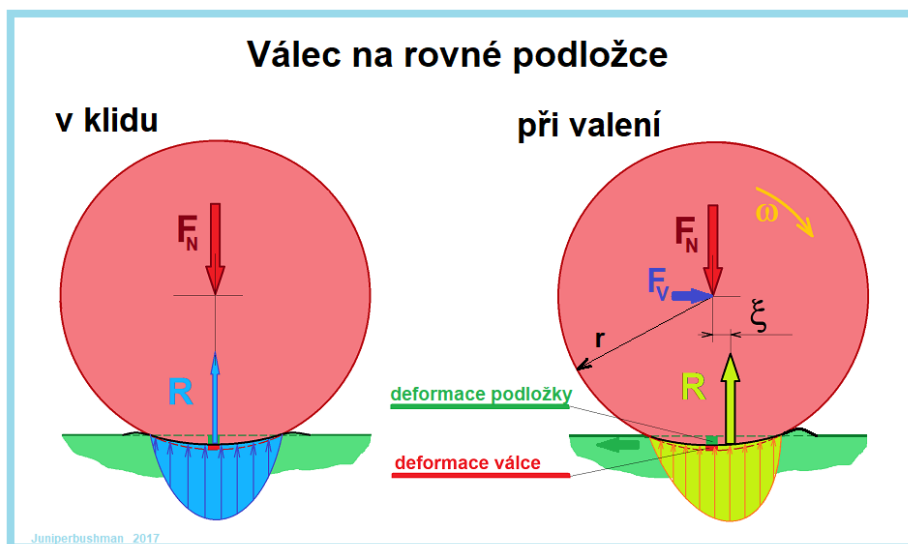
Firma SSI Schäfer, s.r.o. v současné době nedisponuje podobným měřícím zařízením a vzhledem k výše vyjmenovaným důvodům je potřeba toto testovací zařízení zhotovit. Testovací zařízení bude na základě měření schopno stanovit hodnoty valivých odporů kol pro konkrétní podmínky měření. Tyto hodnoty budou dále ve firmě SSI Schäfer, s.r.o. použity výpočtáři pro zpřesnění výpočtových modelů a snadnější volbu kol.

1.1. Stanovené cíle práce

- Zpracovat přehled průmyslových kol od výrobců Tente a Blickle společně s informacemi o jejich valivém odporu
- Návrh konstrukce testovacího zařízení a způsob měření. Konstrukce testovacího zařízení musí být rozebíratelná, pro snadné uskladnění a obsahoval prvek na, kterém by se daly měnit různé typy koleček, které nakupuje firma SSI Schäfer, s.r.o.
- Návrh metodiky vyhodnocení valivého odporu na základě zvolené konstrukce testovacího zařízení
- Pevnostní kontrola navrženého zařízení
- Zhotovení výrobní dokumentace testovacího zařízení v plném rozsahu

2. Valivý odpor

Valivý odpor (nepřesně označován jako valivé tření, neboť stýkající se povrchy vůči sobě neprokluzují) je odpor, který působí na těleso kruhového průřezu při jeho valivém pohybu po podložce (Obr. 2.1). Závisí na mnoha aspektech, např. na poloměru válcového tělesa, materiálech kontaktních těles, zatížení apod. Valivý odpor může být stanoven různými nepřímými metodami (např. měřením točivého momentu, měření síly kola, měření vzdálenosti) zavádějící různé nepřesnosti měření.



Obr. 2.1 – Rozložení reakcí na zatížený válec v klidu a při valení [8]

Jakmile budeme na kulovou nebo válcovou plochu působit horizontální silou (nebo silou vyvozenou kroutícím momentem), dojde k deformaci a začne se navalovat na přední část kontaktní plochy a vznikne postupné odlehčování zadní části. To se projeví nesymetrickým průběhem kontaktního tlaku, jehož výslednice se posune směrem dopředu o tzv. rameno valivého odporu. Velikost tohoto ramene je dána vlastnostmi materiálu kola a podložky např. vnitřním třením mezi podložkou a kolem, dále tuhostí materiálu a strukturou povrchu (drsnot). Velikost valivého odporu vypočítáme z rovnováhy momentů sil (2.1) [8].

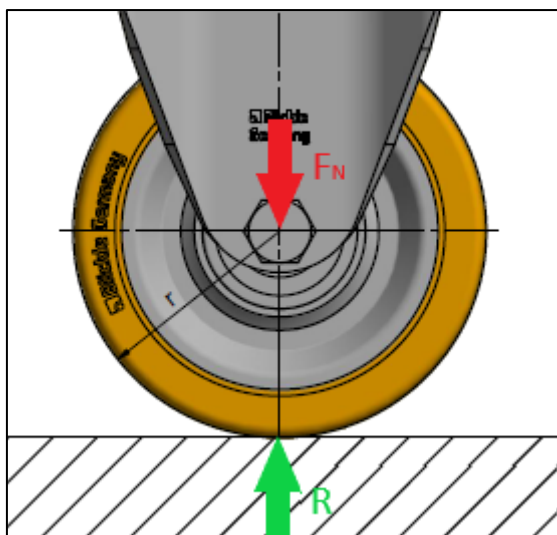
$$M = F_V \cdot r = F_N \cdot \xi \quad (2.1)$$

Po vyjádření z rovnováhy momentů sil (2.1) získáme vztah velikosti valivého odporu (2.2)

$$F_V = \frac{F_N}{r} \cdot \xi \text{ [N]} \quad (2.2)$$

2.1. Statický valivý odpor

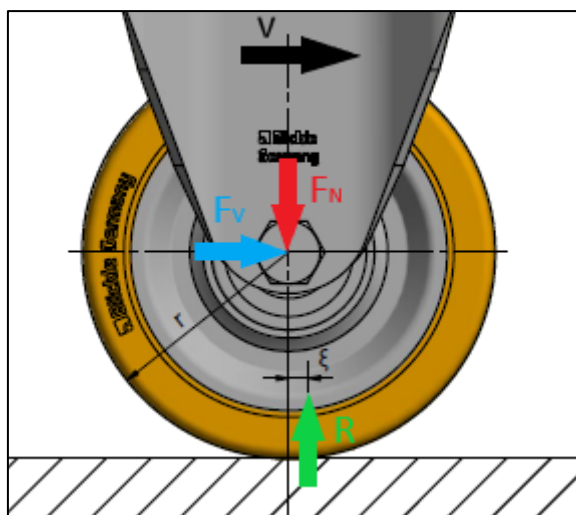
Statický valivý odpor taktéž nazývaný valivý odpor v klidu (Obr. 2.2) je odpor, při kterém dochází k téměř symetrickým deformačním změnám plochy podložky. Na válcovou plochu působí pouze zátěžová síla F_N , která deformuje válcovou plochu. Klidový stav valivého odporu neobsahuje tolik proměnných, jako stav v pohybu.



Obr. 2.2 – Silové působení na kolo v klidu

2.2. Dynamický valivý odpor

Dynamický valivý odpor taktéž zvaný valivý odpor v pohybu (Obr. 2.3) je odpor, při kterém dochází k deformacím jak válcové plochy kola, tak plochy podložky. Při pohybu válcové plochy dochází k deformacím ve tvaru paraboly viz (Obr. 2.1), kde jejich nejvyšší bod se vzdaluje od osy válcové plochy. To samé se děje s plochou podložky, čímž se nám rameno valivého odporu vzdaluje od osy, což má za dopad horší koeficient valivého odporu.



Obr. 2.3 – Silové působení na kolo v pohybu

2.3. Průmyslová kolečka ve firmě SSI Schäfer, s.r.o.

Kolečka od společnosti TENTE výrazně převažují ve firmě SSI Schäfer, s.r.o. Nacházejí se zde otočná, pevná kolečka o různých typech běhounů a vysoké škále průměrů. Tyto kolečka se převážně vyskytují na materiálových vozících (Obr. 2.4).



Obr. 2.4 – Kolečka od společnosti TENTE nacházející se ve firmě SSI Schäfer, s.r.o.

Kolečka od společnosti Blickle (Obr. 2.5) se nevyskytují v takovém počtu jako kolečka od společnosti TENTE. Firma SSI Schäfer, s.r.o. v této době kolečka od Blickle, z důvodu vyšší ceny už neodebírání v takovém množství jako tomu bylo v předešlých letech.



Obr. 2.5 - Kolečka od společnosti Blickle nacházející se ve firmě SSI Schäfer, s.r.o.

2.4. Průmyslová kola od TENTE

Větší část kol od této firmy, které zde uvedu se vyskytují v seznamu nakupovaných produktů firmy SSI Schäfer, s.r.o. Seznam je řazený podle průměru kol a rozlišen na otočné a pevné, které jsem uvedl, viz tabulka 1.

Tabulka 1 – Rozdělení jednotlivých typů koleček od TENTE [6]

Typ kolečka	Kód výrobku	Dynamická nosnost [kg]	Průměr kola [mm]	Stavební výška [mm]	Informace o umístění děr		
					Délka [mm]	Šířka [mm]	Průměr díry [mm]
Otočné	3477ITP125P63	300	125	161	105	75-80	11
Pevné	3478ITP125P63	300	125	161	105	75-80	11
Otočné	3477PJR160P63	160	160	200	105	75-80	11
Pevné	3478UFR160P63	300	160	200	105	75-80	11
Otočné	3477PJP200P63	250	200	240	105	75-80	11
Pevné	849DUF200P67	350	200	240	105	75-80	11
Otočné	4687UOO250P63	800	250	290	105	75-80	11
Pevné	4688UOO250P63	800	250	290	105	75-80	11

V následující tabulce 2 jsou uvedeny technické parametry valivého odporu na stupnici od 1 do 5 přičemž 5 je nejlepší. Stejně zobrazení používá firma TENTE v katalogích.

Tabulka 2 – Technické údaje valivého odporu [6]

Typ kolečka	Kód výrobku	Stupnice valivého odporu				
		1	2	3	4	5
Otočné	3477ITP125P63	+	+	+		
Pevné	3478ITP125P63	+	+	+		
Otočné	3477PJR160P63	+	+	+		
Pevné	3478UFR160P63	+	+	+		
Otočné	3477PJP200P63	+	+	+		
Pevné	849DUF200P67	+	+	+		
Otočné	4687UOO250P63	+	+	+		
Pevné	4688UOO250P63	+	+	+		

Dále uvedu technické parametry kol podrobněji, viz tabulka 3. Informace o konstrukčním provedení, ložisku a materiálu běhounu.

Tabulka 3 – Technické parametry kol od TENTE [6]

Typ výrobku s kódem	Konstrukční provedení kol				Materiál běhounů kol	Ložiska kol
	Otočné	Pevné	Nebržděné	Bržděné		
3477ITP125P63	✓	✗	✗	✓	Polyuretan	Kuličkové ložisko
3478ITP125P63	✗	✓	✓	✗	Polyuretan	Kuličkové ložisko
3477PJR160P63	✓	✗	✗	✓	Termopla- stická guma	Jehlové ložisko
3478UFR160P63	✗	✓	✓	✗	Elastická guma	Jehlové ložisko
3477PJP200P63	✓	✗	✗	✓	Termopla- stická guma	Kuličkové ložisko
849DUFX200P67	✗	✓	✗	✓	Elastická guma	Kuličkové ložisko
4687UOO250P63	✓	✗	✗	✓	Polyamidu	Kluzné ložisko
4688UOO250P63	✗	✓	✓	✗	Polyamidu	Kluzné ložisko

2.5. Průmyslová kola od Blickle

Dva typy kol od této firmy, které zde uvedu se nevyskytují v seznamu nakupovaných produktů firmy SSI Schäfer, s.r.o. Seznam je řazený podle průměru kol a rozlišen na otočné a pevné, které jsem uvedl, viz tabulka 4.

Tabulka 4 - Rozdělení jednotlivých typů koleček od Blickle [7]

Typ kolečka	Kód výrobku	Dynamická nosnost [kg]	Průměr kola [mm]	Stavební výška [mm]	Informace o umístění děr		
					Délka [mm]	Šířka [mm]	Průměr díry [mm]
Otočné	LH-SETH 125K	500	125	170	105	75-80	11
Pevné	BH-SETH 125K	500	125	170	105	75-80	11
Otočné	L-ALTH 160K	300	160	195	105	75-80	11
Pevné	BH-ALTH 160K	550	160	202	105	75-80	11
Otočné	LH-SPO 200K	900	200	245	105	75-80	11
Pevné	BH-GB 200K	900	200	245	105	75-80	11
Otočné	LH-ALTH 250K	900	250	295	105	75-80	11
Pevné	BH-ALTH 250K	900	250	295	105	75-80	11

V následující tabulce 5 jsou uvedeny technické parametry valivého odporu na stupnici od 1 do 5 přičemž 5 je nejlepší. Stejně zobrazení používá firma Blickle v katalogích.

Tabulka 5 – Technické údaje valivého odporu [7]

Typ kolečka	Kód výrobku	Stupnice valivého odporu				
		1	2	3	4	5
Otočné	LH-SETH 125K	+	+	+	+	
Pevné	BH-SETH 125K	+	+	+	+	
Otočné	L-ALTH 160K	+	+	+	+	
Pevné	BH-ALTH 160K	+	+	+	+	
Otočné	LH-SPO 200K	+	+	+	+	+
Pevné	BH-GB 200K	+	+	+	+	+
Otočné	LH-ALTH 250K	+	+	+	+	
Pevné	BH-ALTH 250K	+	+	+	+	

Dále uvedu technické parametry kol podrobněji, viz tabulka 6. Informace o konstrukčním provedení, ložisku a materiálu běhounu.

Tabulka 6 – Technické parametry kol od Blickle [7]

Typ výrobku s kódem	Konstrukční provedení kol				Materiál běhounů kol	Ložiska kol
	Otočné	Pevné	Nebržděné	Bržděné		
3477ITP125P63	✓	✗	✗	✓	Polyuretan	Kuličkové ložisko
3478ITP125P63	✗	✓	✓	✗	Polyuretan	Kuličkové ložisko
3477PJR160P63	✓	✗	✗	✓	Termopla- stická guma	Jehlové ložisko
3478UFR160P63	✗	✓	✓	✗	Elastická guma	Jehlové ložisko
3477PJP200P63	✓	✗	✗	✓	Termopla- stická guma	Kuličkové ložisko
849DUFX200P67	✗	✓	✗	✓	Elastická guma	Kuličkové ložisko
4687UOO250P63	✓	✗	✗	✓	Polyamidu	Kluzné ložisko
4688UOO250P63	✗	✓	✓	✗	Polyamidu	Kluzné ložisko

3. Metody měření valivého odporu

V rámci práce jsem uvažoval s následujícími metodami měření valivého odporu:

- Metoda měření siloměrem při tažení vozíku
- Metoda dojezdu vozíku
- Metoda měření valivého odporu při rozjezdu

3.1. Metoda měření siloměrem při tažení vozíku

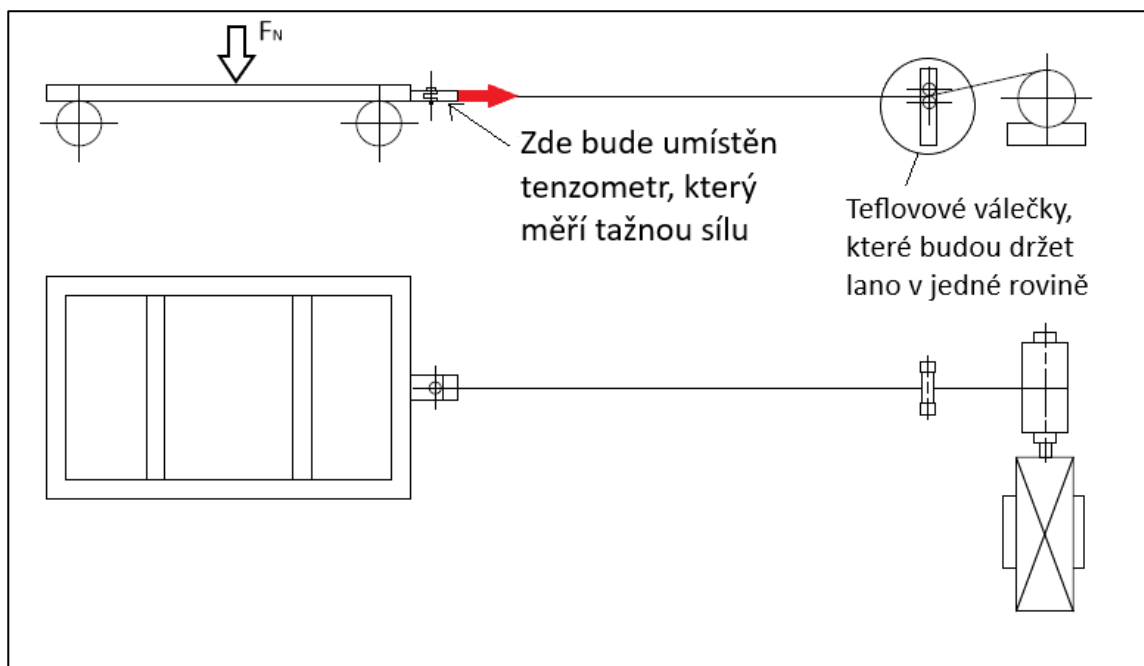
Tato metoda využívá k posuvu vozíku (dále měřícího přípravku) elektropohon (Obr. 3.1). Testovací zařízení se skládala z elektromotoru, navíjecího zařízení, lana, tenzometru a měřícího přípravku. Měření pomocí této metodiky má své výhody a nevýhody, ale je zde několik aspektů, které tuto metodiku nepodporují. Pro provedení experimentu je nutné mít tažné zařízení ke, kterému by byl přichycen tenzometr. Lano by mělo být natažené vodorovně a nesmí mít sklon vůči směru jízdy vozíku, protože by to zkreslovalo měřené hodnoty na přípravku. Pomocí naváděcí kladky obsahující teflonové válečky přes, které by lano vedlo k navíjecímu bubnu, aby se síly, které nám budou vycházet nerozložily do různých silových složek a to přidalo na složitosti výpočtu. Jako zatížení jsem uvažoval nádobu, která by se naplnila vodou. Problém by byl s hladinou, která by se při rozjezdu vozíku rozhoupala a zatížení by nebylo ve všech místech vozíku konstantní, a také by to vedlo ke zkreslení měřících hodnot síly. Řešením je naplnit nádobu s uzávěrem až po okraj, což by odstranilo problémy s nekonstantním zatížením. Nádobu by bylo však možné použít pro vyvození jedné hodnoty zátěže, což by bylo ekonomicky nevýhodné.

Výhody jsou:

- rychlé měření
- možnost změření valivého odpor při rozjezdu

Nevýhody jsou:

- náklady na konstrukci měřícího zařízení
- menší přesnost měření (vliv nerovností povrchu, sklonu lana, stálá rychlost navíjení, atd.).



Obr. 3.1 – Testovací zařízení pro provedení experimentálního měření valivého odporu

3.2. Metoda dojezdu vozíku

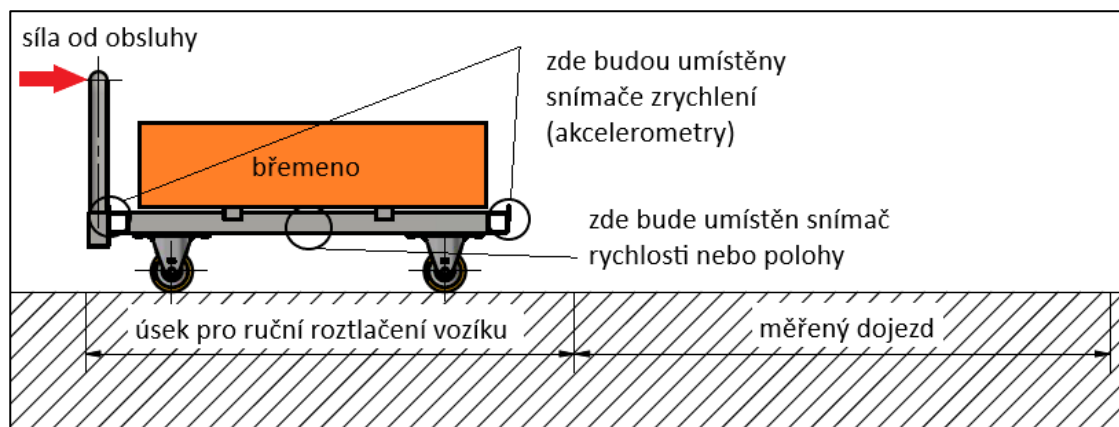
Metoda spočívá v roztlačení vozíku na určitou konstantní rychlost a poté měřením zrychlení, rychlosti nebo polohy v čase při jeho dojezdu. Je možné vozík roztlačit ručně nebo s pomocí pohonu. Dále může být využita šikmá rovina na jeho rozjezd. Princip této metody bude v ručním roztlačení vozíku, pomocí pohonu nebo za použití šikmé roviny s břemenem v měřeném úseku po dobu, než vozík překročí hranici tohoto úseku. Snímače zrychlení (nejlépe ještě snímače polohy nebo rychlosti) se spustí a budou měřit po konec hranice měřeného úseku (Obr. 3.2). Není nutné přesně dodržet hranici, kde by mělo končit tlačení vozíku. Ze snímačů zrychlení a dalších snímačů (poloha, rychlosti) poznáme, kde je začátek dojezdu. Měřicí interval se nastaví před samotným roztlačením vozíku a zastaví se po dojezdu.

Výhody jsou:

- jednoduchá konstrukce měřicího přípravku
- měření v reálných podmínkách
- nízké náklady na výrobu.

Nevýhody jsou:

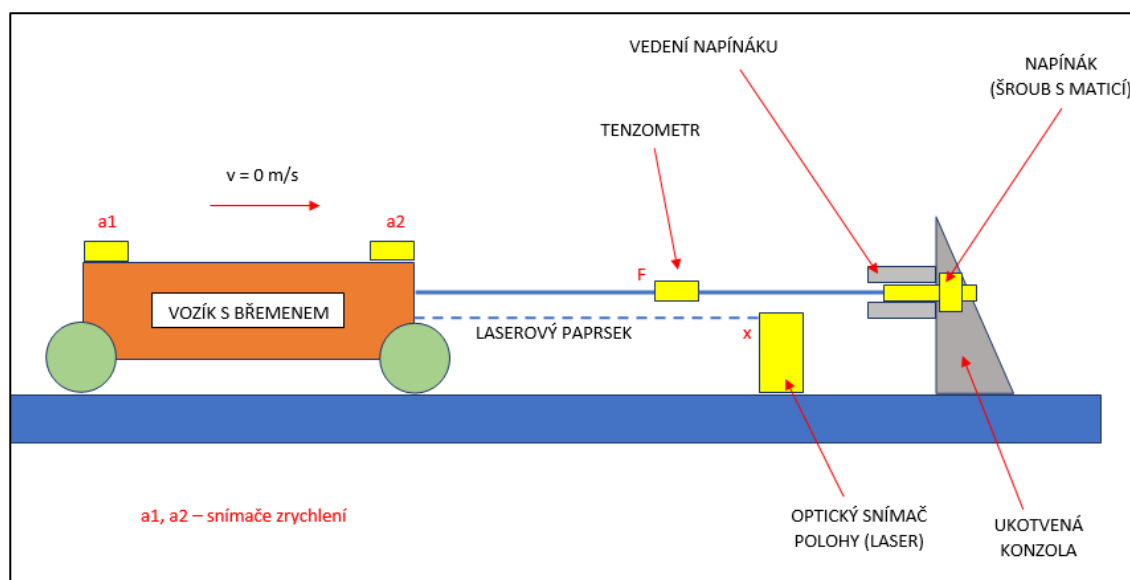
- složitější postup vyhodnocování výsledků
- nemožnost stanovení valivého odporu při rozjezdu



Obr. 3.2 – Metoda měření valivého odporu při pohybu

3.3. Metoda měření valivého odporu při rozjezdu

Sestava vozíku se zátěží je v klidovém stavu spojena s lanem, od napínacího šroubu konzoly je napojeno druhé lano. Obě lana spojuje tenzometr, který měří sílu napínání (Obr. 3.3). Pomalým ručním utahováním šroubu zvyšujeme sílu v lanu, velikost síly je měřena siloměrem a poloha bude měřena optickým snímačem (laserem). Další faktory, které ovlivňují odpor při rozjezdu jsou, materiál běhounu, materiál povrchu, sklon a kvalita pojezdové polohy po kterém je vozík tažen a hodnota zatížení vozíku. U tohoto měření budou zapotřebí dva snímače zrychlení, optický snímač polohy a tenzometr. Snímače zrychlení jsou v tomto měření vedlejší a přinesou nám informaci o dynamickém chování kol a vozíku. Výsledky jsou časové záznamy síly, polohy a zrychlení vozíku ve dvou (vodorovně a svisle).



Obr. 3.3 – Metoda měření valivého odporu při rozjezdu

3.4. Výběr metody měřicího zařízení

Nyní po uvedení metod měření, jsem následující metodu vybíral dle kritérií. Kritéria pro návrh tohoto zařízení jsou:

- nízká cena
- nenáročná výroba
- snadná montáž
- jednoduché uskladnění
- minimalizovat počet nakupovaných dílů jako jsou například elektromotor, kladky a lana

Vybral jsem dojezdovou zkoušku, která dle daných kritérií vyhovovala nejlépe. Tato metoda obsahuje výhody, které jsou požadované více než u ostatních metod. Samotné měření by mělo být provedeno v reálných podmínkách v podniku SSI Schäfer, s.r.o.

4. Návrh konstrukce testovacího zařízení

Konstrukční provedení testovacího zařízení vychází ze zvolené metody měření valivého odporu, viz kapitola (3.4).

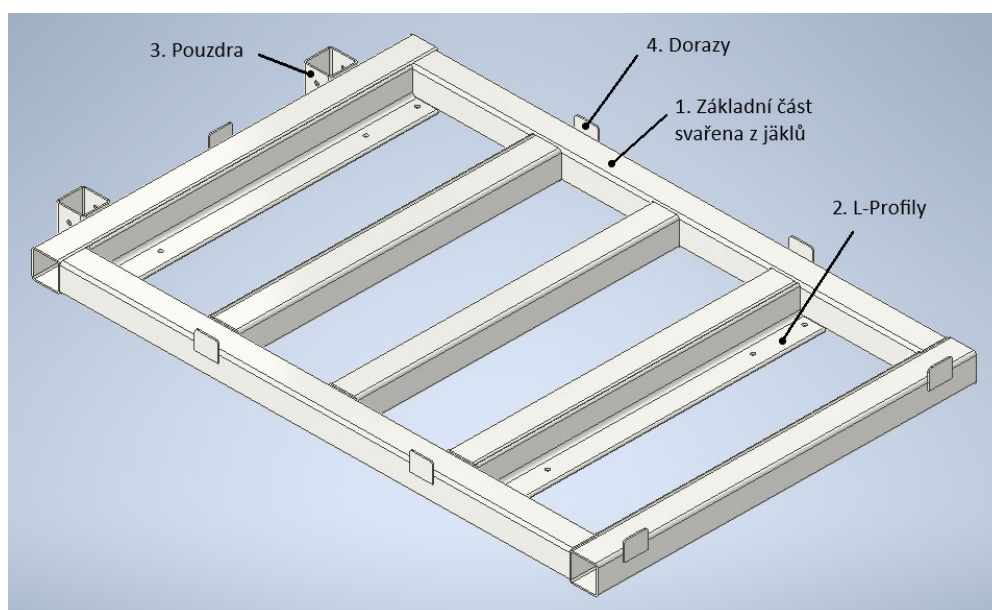
4.1. Popis testovacího zařízení

Rozměry testovacího zařízení byly zvoleny tak, aby se na něj mohla postavit europaleta se zátěží 1500 kg, rozměry europalety 1200 x 800 x 144 (délka x šířka x výška) (Obr. 4.1). Testovací břemeno bude vytvořeno z pytlů s pískem. Díky tomu bude možno snadno měnit zatížení měřícího zařízení.



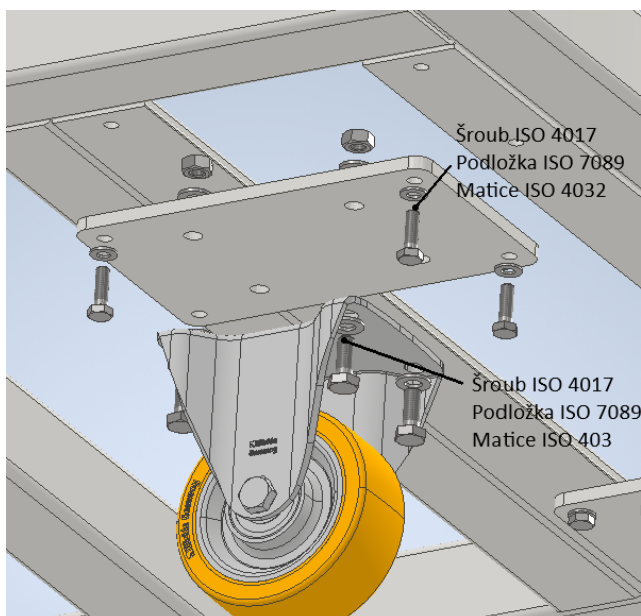
Obr. 4.1 – Náhled europalet nacházející se ve firmě SSI Schäfer, s.r.o. [9]

Základní rám se skládá z jáklů, které tvoří prostor pro umístění europalety. Rozměry jsou větší, z důvodu tolerancí výroby europalety. V základním rámu jsou také navařeny 1. jákly, 2. L-profily, 3. pouzdra a 4. dorazy (Obr. 4.2). Plechy navařené okolo rámu tvoří dorazy pro europaletu. L-profily budou sloužit k přišroubování plechů, na které se poté uchytí konzoly kol.



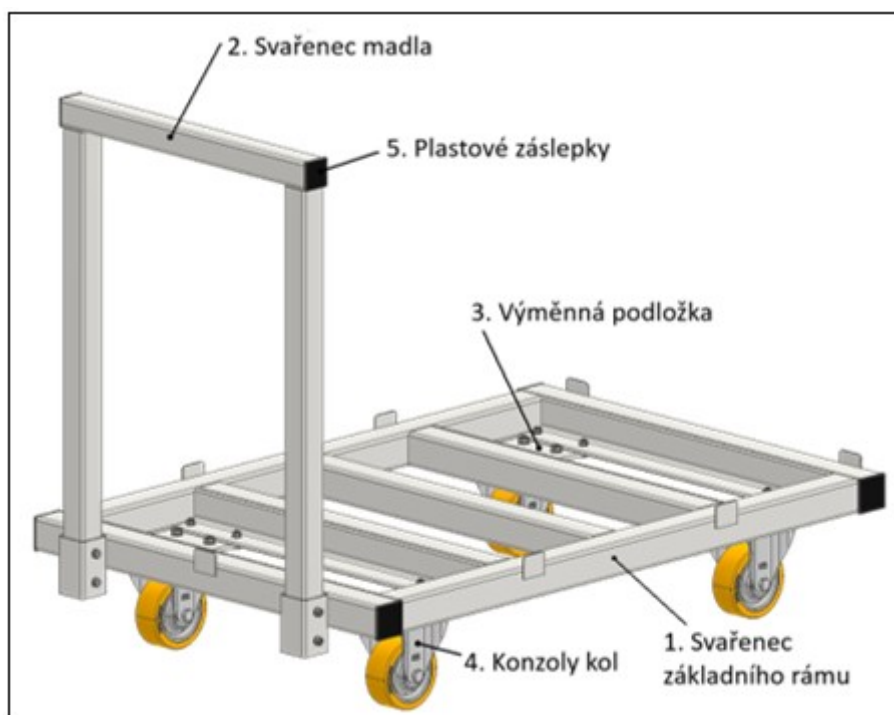
Obr. 4.2 – Základního rámu měřícího přípravku

Plech pro uchycení kol jsou demontovatelné a s rámem jsou spojeny šroubovým spojem s L-profil. Na výměnné plechy jsou šroubovým spojem uchyceny konzoly kol (Obr. 4.3). Toto řešení umožňuje snadnou výměnu za desku s jinými připojovacími rozměry, řešení pomocí svaření desky s rámem by neumožňovalo případné další výměny konzol kol.



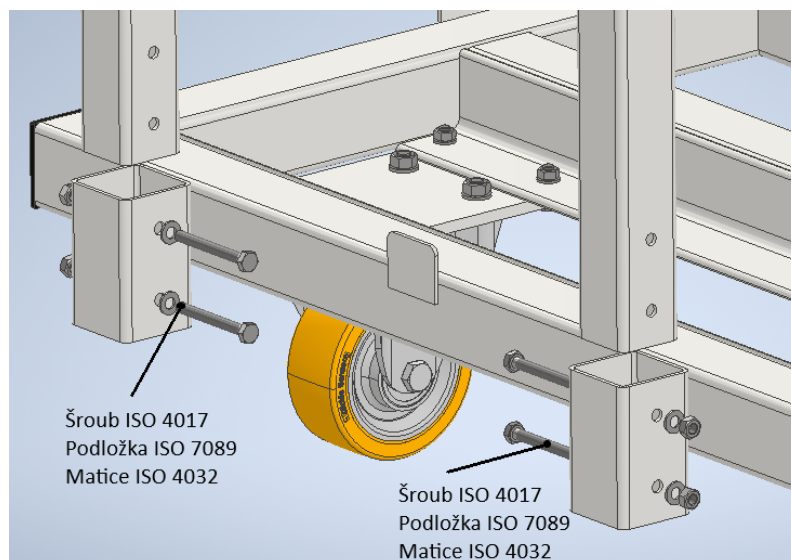
Obr. 4.3 – Spojení rámu s výměnnou deskou a konzolou kola pomocí šroubových spojů

Posledním dílem sestavy je odnímatelné tlačné madlo (Obr. 4.4). Madlo je záměrně menší s ohledem na možnou nerovnoměrnost zatížení kol při roztlačování testovacího zařízení s europaletou a břemenem.



Obr. 4.4 - Náhled na testovací zařízení s odnímatelným madlem

Madlo je svařenec z dutých čtvercových profilů EN 10219 [10]. Madlo je vsunuto do krátkých dutých profilů, které jsou přivařené k základnímu rámu a je upevněno pomocí šroubového spojení (Obr. 4.5). Z důvodu snadného rozkládání a skládání pro jednoduché uskladnění.



Obr. 4.5 – Spojení madla s pouzdry pomocí šroubových spojů

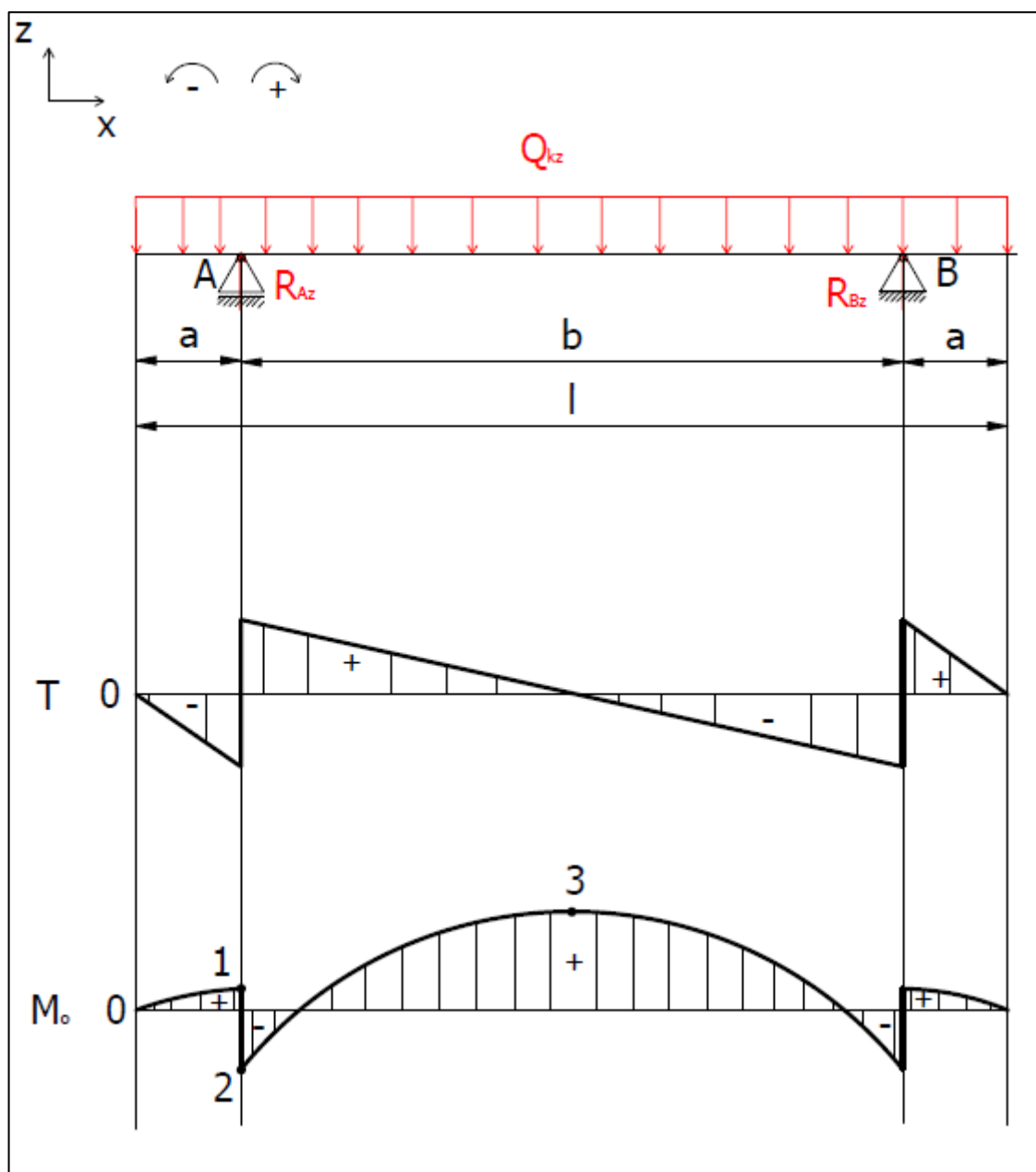
Všechny otevřené konce dutých profilů jsou z důvodu bezpečnosti na pracovištích zakryty plastovými záslepkami.

4.2. Návrhový výpočet hlavního nosného profilu

K výpočtu jsem vybral nosný profil viz (Obr. 4.6) o délce $l = 1,088$ m na který působí spojitě zatížení o velikosti $Q_{kz} = 2,4366 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, viz kapitola (6.3.2) s dvěma kloubovými podpěrami nahrazující konzoly koleček. Vzdálené od konců nosného profilu o $a = 0,131$ m a mezi sebou o $b = 0,826$ m. Materiál nosného profilu je S235JRH s mezí kluzu $R_e = 235 \text{ MPa}$ [4]. Součinitel bezpečnosti $k = 1,78$, viz kapitola (6.4.1), který jsem získal z tabulky 9 pro pruty a napětí při stání vozíku se součiniteli napětí.



Obr. 4.6 – Vybraný nosný profil z celkové sestavy



Obr. 4.7 – Nosný profil namáhaný spojitým zatížením s průběhy posouvajících sil a ohybových momentů

Silový rozklad:

$$\sum F_x = 0 \quad (4.1)$$

Momentová rovnice k bodu A podle daného směru otáčení viz (Obr. 4.7):

$$\sum M_{oA} = 0 = -R_{Bz} \cdot b + Q_{kz} \cdot (a + b) \cdot \frac{(a + b)}{2} - Q_{kz} \cdot a \cdot \frac{a}{2} \quad (4.2)$$

Z rovnice (4.2) jsem vytknul reakci R_{Bz} , abych ji následně mohl vypočítat.

$$R_{Bz} = \frac{+Q_{kz} \cdot (a + b) \cdot \frac{(a + b)}{2} - Q_{kz} \cdot a \cdot \frac{a}{2}}{b} =$$

$$\frac{+2436,6 \cdot (0,131 + 0,826) \cdot \frac{(0,131 + 0,826)}{2} - 2436,6 \cdot 0,131 \cdot \frac{0,131}{2}}{0,826} \quad (4.3)$$

$$R_{Bz} = 1325,51 \text{ N}$$

Ze silové rovnice dle osy z (4.4) vytknu reakci R_{Az} , kterou vypočítám za pomoci již vypočítané reakce R_{Bz} z rovnice (4.3).

$$\sum F_z = 0 = R_{Az} + R_{Bz} - Q_{kz} \cdot l \quad (4.4)$$

$$R_{Az} = -R_{Bz} + Q_{kz} \cdot l \quad (4.5)$$

$$R_{Az} = -1325,51 + 2436,6 \cdot 1,088 = 1325,51 \text{ N}$$

Dále vypočítám ohybové momenty v bodech 1, 2 a 3 viz (Obr. 4.7), abych z nich mohl určit M_{omax} :

$$M_{o1} = Q_{kz} \cdot a \cdot \frac{a}{2} = 2436,6 \cdot 0,131 \cdot \frac{0,131}{2} = 20,91 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.6)$$

$$M_{o2} = Q_{kz} \cdot a \cdot \frac{a}{2} - R_{Bz} \cdot a$$

$$M_{o2} = 2436,6 \cdot 0,131 \cdot \frac{0,131}{2} - 1325,51 \cdot 0,131 \quad (4.7)$$

$$M_{o2} = -152,73 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{o3} = Q_{kz} \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{l}{2} - R_{Bz} \cdot a$$

$$M_{o3} = 2436,6 \cdot \frac{1,088}{2} \cdot \frac{1,088}{2} - 1325,51 \cdot 0,131 \quad (4.8)$$

$$M_{o3} = 186,897 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Z výpočtů ohybových momentů pro dané body vyplývá, že $M_{omax} = M_{o3}$.

Pro samotný návrhový výpočet použiji výpočtovou (pevnostní) rovnici na ohyb (4.9):

$$\sigma_{oDOV} \geq \sigma_{omax} \quad (4.9)$$

Kterou dále upravím na rovnici (4.10).

$$\frac{R_e}{k} \geq \frac{M_{omax}}{W_o} \quad (4.10)$$

Z rovnice (4.10) vytknu W_o dále značené jako W_{omin} .

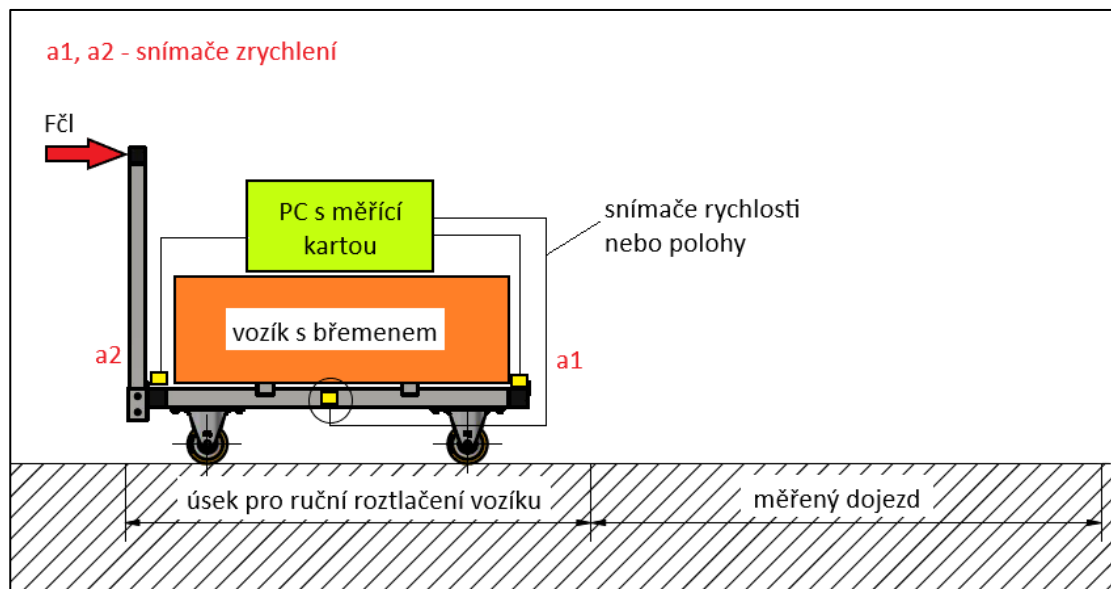
$$W_{omin} = \frac{M_{omax} \cdot k}{R_e} = \frac{186897 \cdot 1,78}{235} = 1415,65 \text{ mm}^3 \quad (4.11)$$

Podle minimálního průřezového modulu v ohybu navrhuji velikost dutého čtvercového profilu průřezu 60 x 3 s $W_o = 11710 \text{ mm}^3$ podle [10].

5. Metodu pro vyhodnocení experimentálního měření valivého odporu

V následujících podkapitolách uvedu metodu pro vyhodnocení experimentálního měření valivého odporu.

5.1. Popis měření



Obr. 5.1 - Metoda experimentálního stanovení valivého odporu kol

Z důvodu statistického zpracování dat bude měření pro každý typ kola a každou zátěž provedeno minimálně desetkrát (Obr. 5.1). Takže k úplnému otestování každého typu kola bude zapotřebí provést přinejmenším $10 \times 5 = 50$ experimentálních měření, viz tabulka 7.

Tabulka 7 - Rozsah experimentálního měření pro jeden typ kola

Typ kola	Zátěž [kg]	Číslo měření									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	300										
	600										
	900										
	1200										
	1500										

Měřenými veličinami budou zrychlení v přední a zadní části testovacího zařízení. Dále pak poloha nebo rychlost (umístění snímače v závislosti na typu), případně obojí. Dále se zapíše, jaký typ podlahy je v daném místě – průmyslová betonová podlaha apod.

Postup měření by měl být takový:

- 1) Příprava experimentálního prostoru (vymezení prostoru – pásky, barva atd. a kontrola sklonu pojezdové plochy digitální vodováhou)
- 2) Před každým měřením se запиše hodnota teploty v měřeném prostoru.
- 3) Zatížení testovacího zařízení
- 4) Kontrola měřicí techniky a testovacího zařízení
- 5) Nastavení měření (měřicí interval, vzorkovací frekvence a spuštění měření)
- 6) Roztlačení zatíženého testovacího zařízení na požadovanou rychlost (přibližně)
- 7) Dojezd testovacího zařízení
- 8) Ukončení měření na počítači (počítač by měl být umístěn na testovacím zařízení, ať se kabeláž nevtáhne za sebou)
- 9) Uložení naměřených hodnot do počítače

Postup přinejmenším desetkrát opakovat pro každý typ kola a nastavenou zátěž.

5.2. Zpracování experimentálních dat

Zpracování dat musí být provedeno ve vhodném software. S pomocí software Scilab lze vytvořit skript, který zpracuje velké množství dat.

- 1) Filtrování dat (odstranění šumu), zkrácení záznamů dat (zbytečné úseky dat po skončení měření – po dojezdu testovacího zařízení) a uložení takto upravených dat (skript vytvoří v SSI Schäfer s.r.o.)
- 2) Grafické zobrazení experimentálních dat a kontrola (Scilab, Excel)
- 3) Vyloučení nevyhovujících dat (pokud se tak stane, tak je nutné zopakovat určité měření)
- 4) Grafické rozpoznání dojezdové fáze z dat (určení časových okamžiků zahájení dojezdové fáze a zastavení testovacího zařízení s břemenem, odečtení rychlosti na počátku dojezdové fáze)

Výsledná data jsou: časový záznam zrychlení v přední a zadní části vozíku, časový záznam rychlosti, časový záznam polohy.

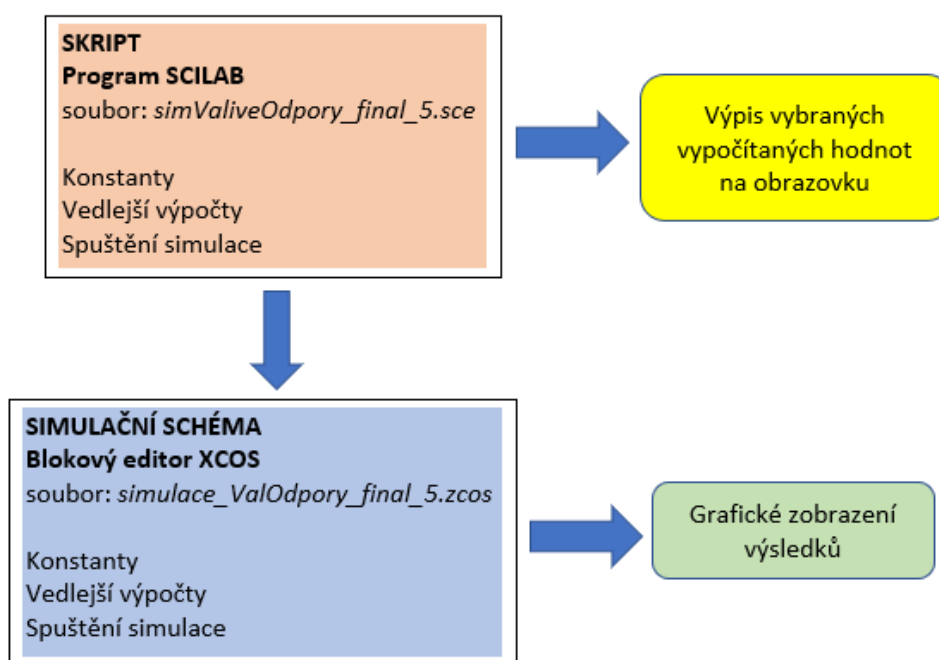
V případě, že by měření neproběhlo se snímačem rychlosti, byla by rychlost testovacího zařízení při dojezdu stanovena numerickou integrací průběhů zrychlení. Pokud by nebyl k dispozici snímač polohy, stanovila by se poloha vozíku numerickou integrací rychlosti. Skript pro tuto případnou úpravu dat v software Scilab vytvoří v SSI Schäfer s.r.o.

V ideálním případě je dobré měřit všechny uvedené veličiny.

5.3. Matematický model a simulace

Pro početní určení velikosti valivého odporu byl (ve firmě SSI Schäfer s.r.o.) v software Scilab a blokovém editoru XCOS vytvořen simulační model [2].

Struktura numerického modelu je patrná z (Obr. 5.2). Tvoří jej dva soubory. První soubor je skript, ve kterém jsou uvedeny veškeré konstanty popisující modelovanou situaci a jsou zde stanoveny počáteční a okrajové podmínky simulace a provedeny další vedlejší výpočty. Skript spouští simulaci. K simulaci bylo vytvořeno simulační schéma, (Obr. 5.2).



Obr. 5.2 - Struktura numerického modelu ve SCILABu a blokovém editoru XCOS

Výstupem výpočtu ve SCILABu je výpis vybraných hodnot na obrazovku (pro počáteční kontrolu) a grafické zobrazení výsledků, kterými jsou časové průběhy zrychlení, rychlosti a polohy testovacího zařízení během dojezdové fáze pohybu.

Příklad výstupu dat ze simulace je uveden na obrázcích níže. Výpočet byl nastaven pro tyto vstupní podmínky:

Rám vozíku

- hmotnost vozíku 70 kg
- počáteční rychlost 0,35 m/s
- vzdálenost předních a zadních kol vozíku 1 m
- poloha těžiště vozíku od osy zadního kola osa x 0,5 m a osa y 0,18 m
- moment setrvačnosti rámu vzhledem ke svému těžišti v ose z

Kola vozíku

- Počet kol zadní a přední nápravy 2 a 2 kola
- Hmotnost kola 2,5 kg
- Moment setrvačnosti kola v kolmém směru
- Poloměr kola 0,125 m
- Tuhost a tlumení kola v kolmém směru
- Rameno valivého odporu
- Třecí moment ložiska kola
- Tuhost a tlumení kola v tečném směru

Břemeno

- Hmotnost břemene 1500 kg
- Poloha těžiště břemene od zadní osy kola osa x 0,5 m a osa y 0,245 m
- Moment setrvačnosti břemene vzhledem ke svému těžišti v ose z

Madlo

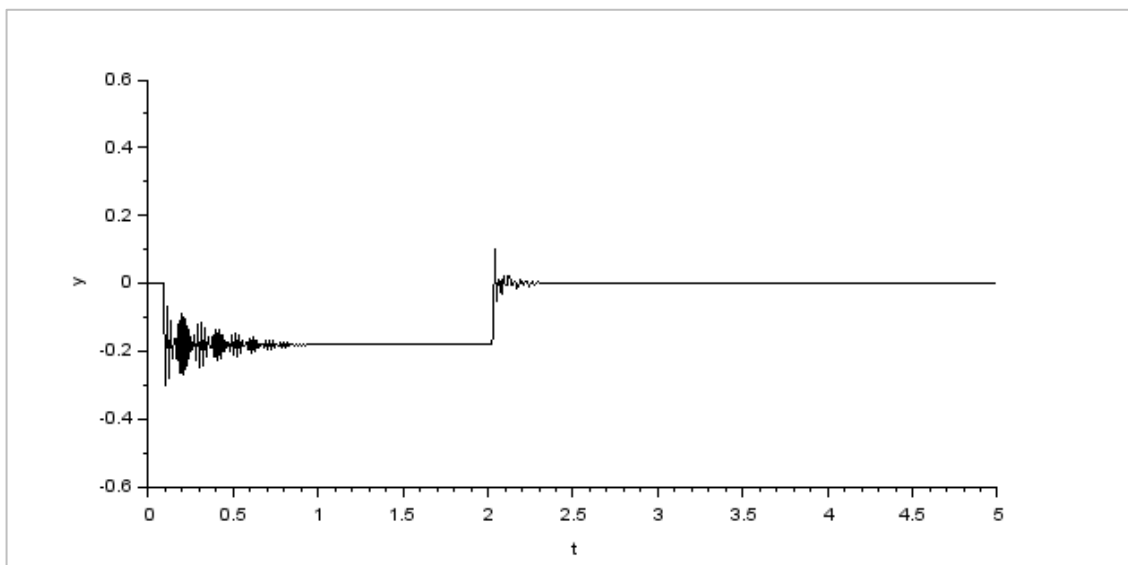
- Vodorovná a svislá poloha madla osa x -0,005 m a osa y 0,3 m

Čepy kol

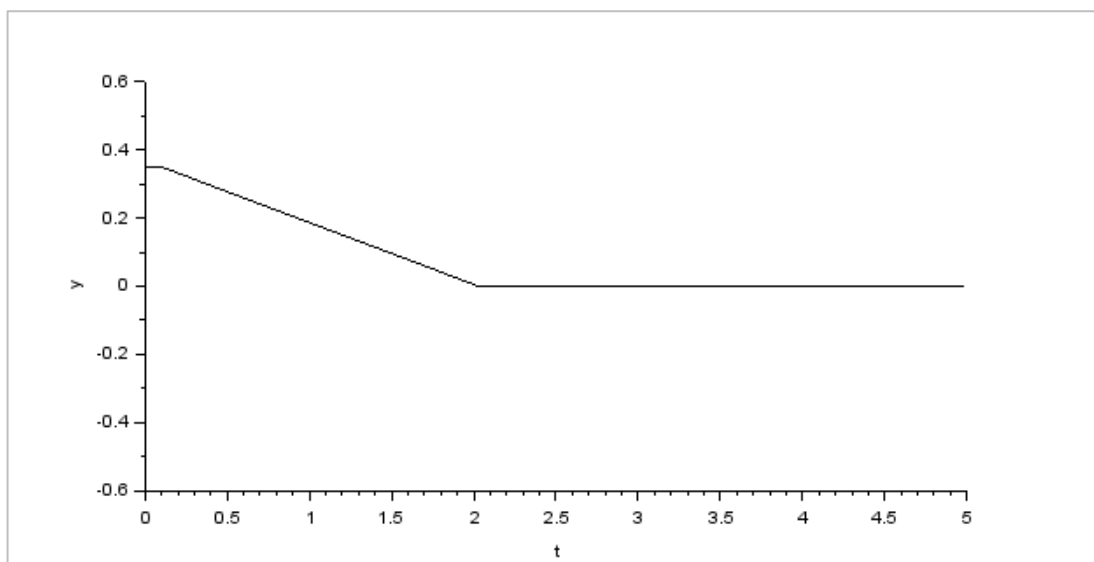
- Tuhost a tlumení čepů kol ve vodorovném a svislém směru

Testovací dráha

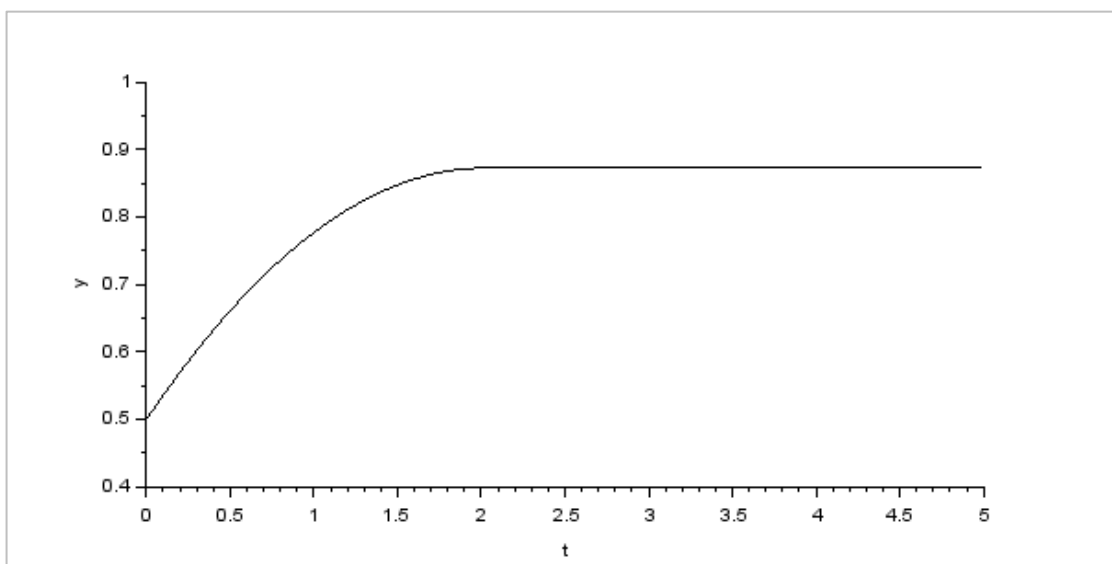
- Sklon dráhy ve směru jízdy 0°



Obr. 5.3 - Simulace zrychlení testovacího zařízení



Obr. 5.4 - Simulace rychlosti testovacího zařízení



Obr. 5.5 - Simulace polohy testovacího zařízení

V čase t_s je zahájena fáze dojezdu testovacího zařízení. Počáteční rychlost je $v = 0,35$ m/s. V čase t_F je pohyb vozíku zastaven.

Jak je patrné z (Obr. 5.3), při skokovém odlehčení testovacího zařízení (na počátku dojezdové fáze) má průběh zrychlení rozkmitaný a tlumený charakter. K podobnému a menšímu neustálenému ději dochází v okamžiku dosažení klidového stavu. Amplitudu, frekvenci a útlum průběhu ovlivňuje zejména tuhost a tlumení kol (běhouny kol).

Ustálená hodnota zrychlení má během dojezdové fáze hodnotu $a = -0,2$ m/s².

Na (Obr. 5.4) je znázorněn průběh rychlosti testovacího zařízení. Počáteční hodnota rychlosti $v = 0,35$ m/s. Rychlost dojezdu má lineární průběh, což je způsobeno konstantním nastavením hodnoty třecího momentu u ložisek a konstantní hodnotou ramene valivého odporu u kol.

Na (Obr. 5.5) je zobrazen časový průběh polohy testovacího zařízení. Počáteční hodnota odpovídá poloze celkového těžiště testovacího zařízení s břemenem. Jak je patrné, dojezd trval 2 sekundy a během této doby ujelo testovací zařízení dráhu 3,5 metru.

5.4. Určení valivého odporu kol

Pro určení valivého odporu kol průmyslových vozíků byla získána experimentální data a byl vytvořen simulační model, ve kterém je valivý odpor kol a třecí moment v ložiscích reprezentován konstantní hodnotou. Ve skutečnosti mohou být obě veličiny nelineární a závislé na několika dalších parametrech. Zda se bude jednat o zanedbatelné nebo výraznější nelineární chování, ukážou výsledky experimentálního měření. Konstantní hodnoty třecího momentu ložisek a valivého odporu kol lze v simulačním modelu dle potřeby nahradit nelineárními modely. Návrh těchto modelů (matematických vztahů) by měl být proveden na základě grafického vyhodnocení dat. Pro určení třecích momentů ložisek mohou být užitečné informace od renomovaných výrobců ložisek, například od SKF.

Při spuštění výpočtu ve SCILABu pomocí skriptu *simValiveOdpor_final_5.sce* dojde k načtení experimentálních dat v souborech ve formátu (.txt nebo .csv). Funkce načtení dat není nyní ve skriptu vytvořena.

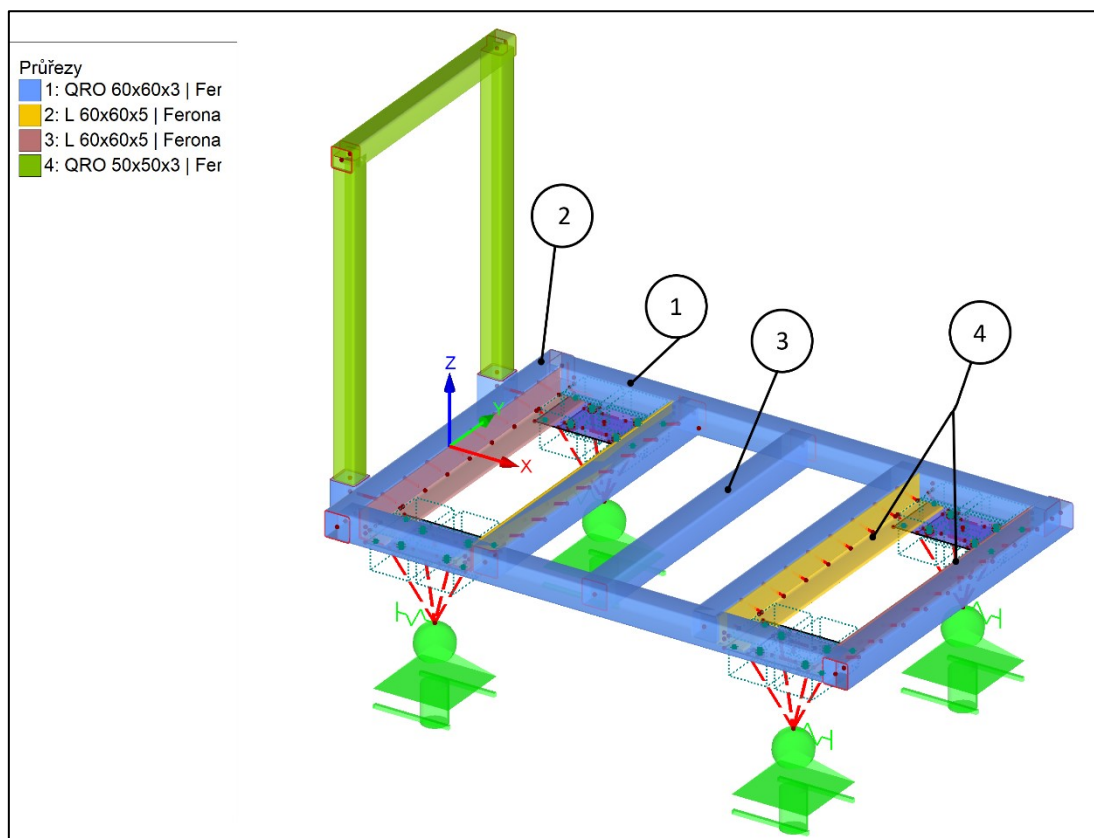
Pro určení valivého odporu kol bude dále zapotřebí využít vhodného optimalizačního algoritmu, např. metodu Monte Carlo [11]. Tento algoritmus by měl být implementován do skriptu *simValiveOdpor_final_5.sce*, který spouští simulaci. Optimalizační algoritmus bude opakovaně (v cyklu) nastavovat náhodně a v určitém povoleném rozmezí výchozí konstanty simulačního modelu, provádět vstupní výpočty a spouštět simulaci. Počet opakování simulací bude nastaven pevně na určitou hodnotu (počet iterací). Simulované průběhy zrychlení, rychlosti a polohy se budou srovnávat s načtenými experimentálními daty zrychlení, rychlosti a polohy. Kvalita shody experimentálních a simulovaných dat bude hodnocena podle určité zvolené funkce (fitness). Čím lepší hodnota této funkce (minimum nebo maximum), tím lepší shoda experimentálních dat se simulovanými průběhy. Po proběhnutí první iterace (první simulace ve SCILABu) budou simulovaná data uložena spolu s dosaženou hodnotou funkce fitness. Po proběhnutí každé další iterace budou srovnávány hodnotící funkce stávajících (uložených) simulovaných dat s novými simulovanými daty. Jestliže bude hodnotící funkce nových dat lepší, budou stávající simulovaná data nahrazena novými (včetně nové hodnotící funkce).

Výpočet může být ukončen před dosažením předem zvoleného počtu nastavených iterací cyklů, např. pokud bude dosaženo požadované kvality shody simulovaných dat s experimentem. Výsledkem budou konstanty a funkce, pomocí kterých bude možné stanovit valivý odpor testovaných kol v reálných podmínkách (přinejmenším v podmínkách experimentálního měření).



Obr. 6.2 – Sestava testovacího zařízení v programu Inventor 2020

Rámová konstrukce testovacího zařízení je modelována pomocí prutových prvků. Připojovací desky kol jsou vytvořeny pomocí ploch a svary profilů jsou nahrazeny tuhými pruty. V numerickém modelu jsou kola nahrazena tuhými plochami. Polohy podpěr v modelu odpovídají místu kontaktu kol s pojezdovou plochou, viz (Obr. 6.3).

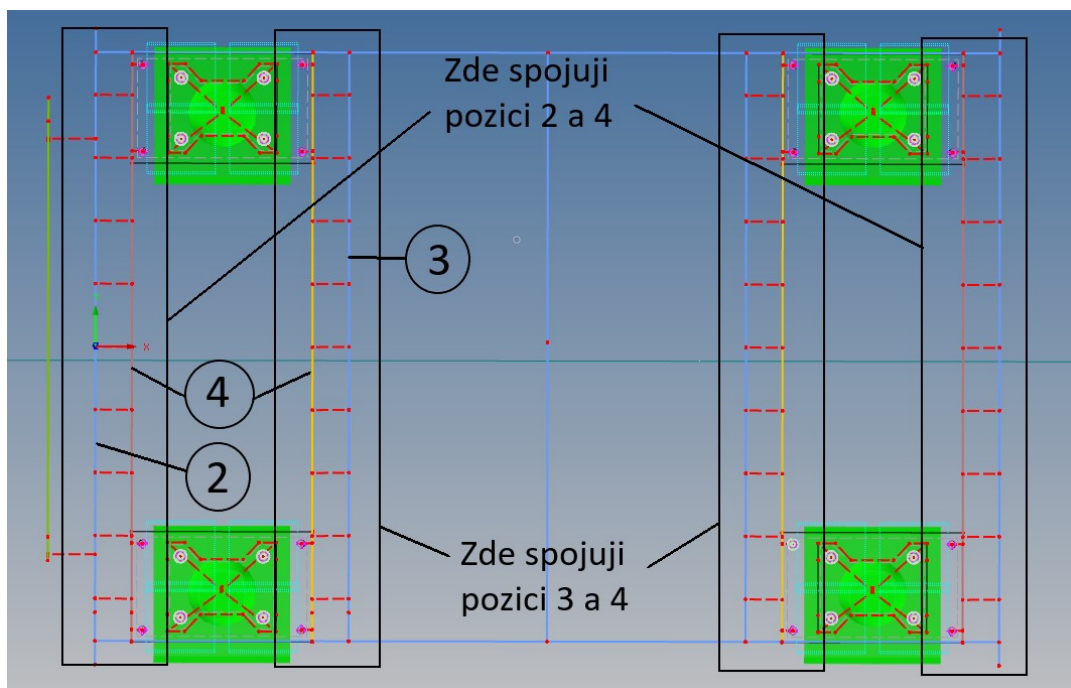


Obr. 6.3 – Pohled na zjednodušený numerický model

Rozměry numerického modelu odpovídají rozměrům 3D modelu testovacího zařízení. Půdorysné rozměry rámu testovacího zařízení jsou (duté profily modré barvy) 1148 mm na délku a 808 mm na šířku.

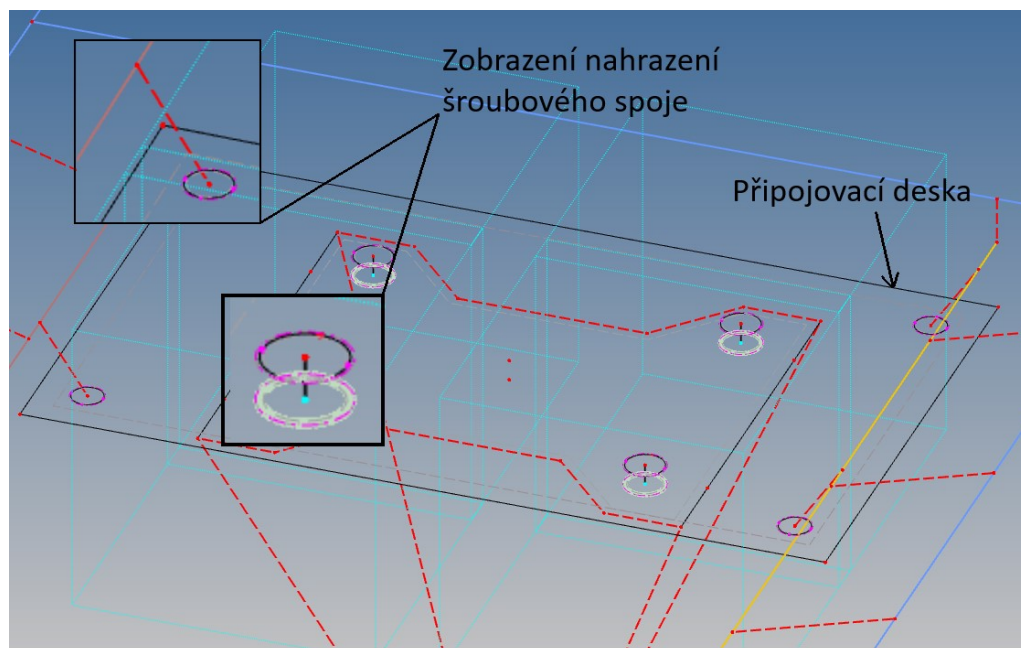
Rám tvoří dle (Obr. 6.3) dva duté profily EN 10219 [10] délky 1148 mm (1), dva příčné profily EN 10219 [10] délky 808 mm (2) a tři profily EN 10219 [10] délky 748 mm (3).

Příčné L-profily EN 10056 [10] slouží pro připojení desek, na které se připojí testovaná kola, viz (Obr. 6.3), pozice (4). Tyto pruty jsou spojeny se základním rámem pomocí tuhých prutů, které nahrazují svary (Obr. 6.4).



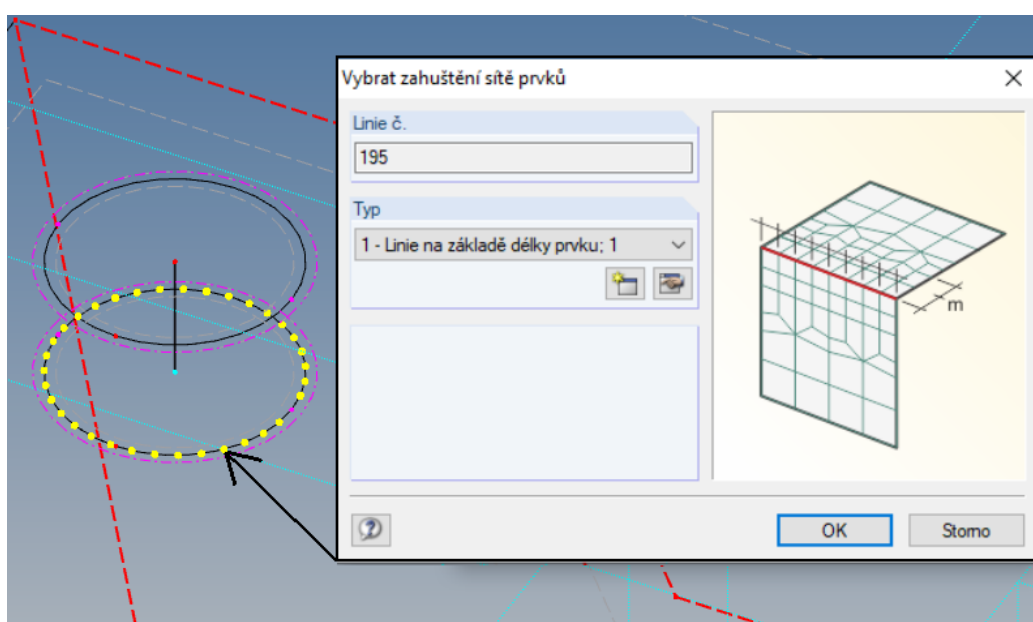
Obr. 6.4 – Spojení L-profilů se základním rámem pomocí tuhých prutů

Připojovací desky kol mají rozměry 230 x 140 mm a tloušťce 8 mm, viz (Obr. 6.5) a jsou k L-profilům připojeny pomocí tuhých prutů. Tuhé pruty nahrazují šrouby M8 ISO 4017 a M10 ISO 4017. Tuhé pruty se v RFEMu používají k modelování spojení dvou prutů, dvou ploch nebo kombinací nahrazuje svarové spoje a šroubové spoje (spoje obecně). Šroubový spoj je v RFEMu nahrazen dvěma tuhými plochami a tuhým prutem, viz (Obr. 6.5). Pokud by byl tuhý prut připojen přímo k ploše s konečnou tuhostí, byla by zde napěťová špička, která by mohla přesáhnout mez kluzu materiálu. Z tohoto důvodu se pro lepší přenos sil přidávají na rozhraní mezi tuhé pruty a plochy s konečnou tuhostí, tuhé plochy, viz šroubové spoje (Obr. 6.5). Pokud je ke spojení ploch použito více tuhých prutů, síly se distribuují do více míst a tím mohou být napěťové špičky menší, například svary viz (Obr. 6.4).



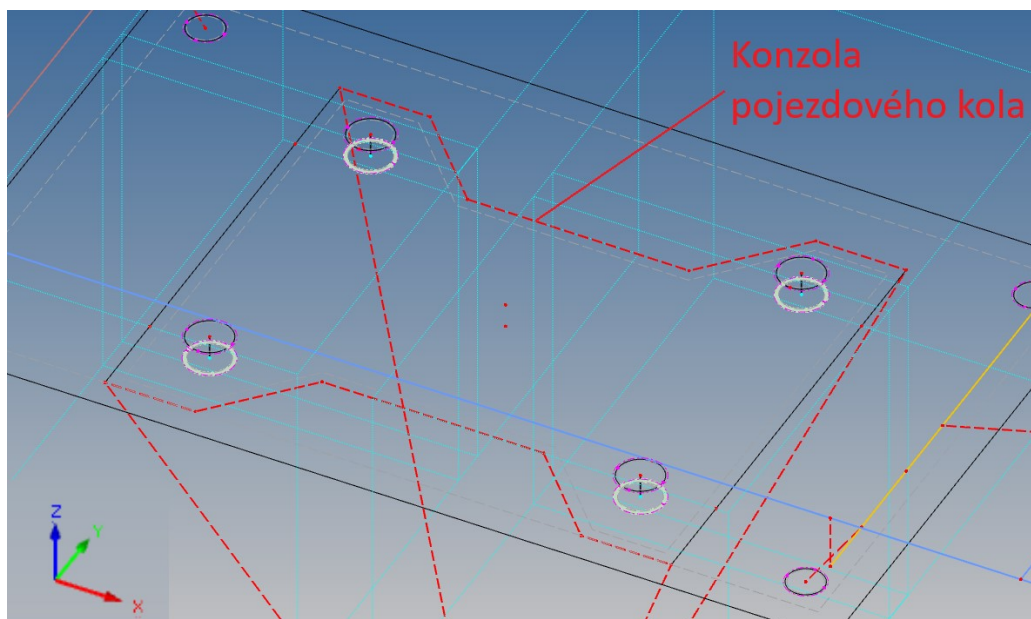
Obr. 6.5 – Plocha nahrazující spojovací plech

Bude testováno více typů kol a předmětem pevnostní kontroly byl rám testovacího zařízení. U kol kontrolujeme pouze velikost silových reakcí. Z toho důvodu jsou konzoly pojezdových kol modelovány pomocí tuhých prutů viz (Obr. 6.7). Konzoly kol mají tloušťku 4 mm, což znamená že plocha konzoly je vzdálena od plochy spojovacího plechu 6 mm. U těchto děr byla zjemněna síť na přechodu s tuhými plochami, které se nacházejí v díře to způsobilo zahuštění linií (Obr. 6.6) pro pozdější lepší výsledky. Je tedy třeba na modelu tělesa vytvořit síť konečných prvků. Pro každý typ prvku je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení (např. posuvy a natočení, z kterých dále počítáme pretvoření a napětí).



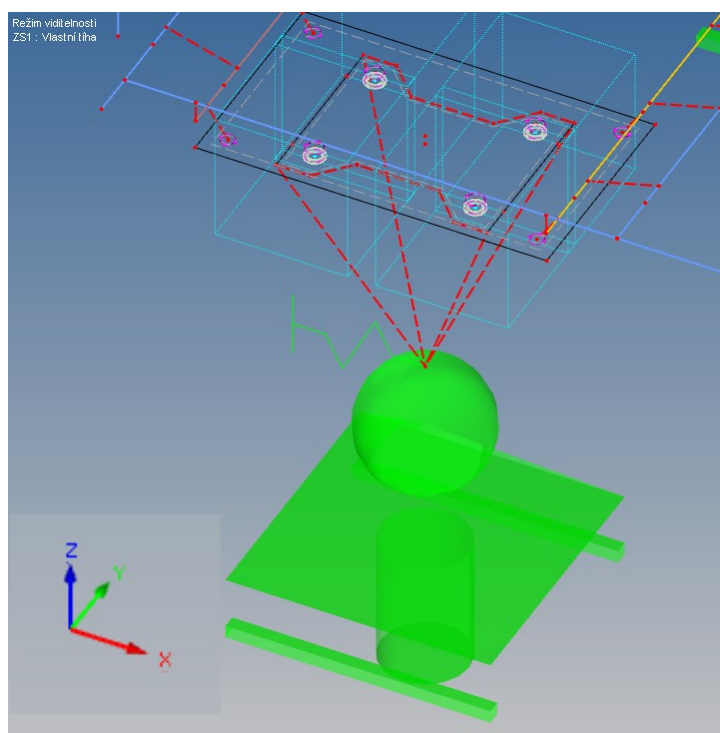
Obr. 6.6 – Zahuštění sítě na liniích otvorů

Spojovací šrouby kol (M10 ISO 4017) jsou modelovány pruty o průměru $d_3 = 8,16$ mm [1], což je spojovací bod plochy konzoly, který je uzlově uvolněn (modré krychle) (Obr. 6.7), což nám umožní uvolnit posuv nebo rotaci v uzlu pro daný prut. Pruty byly uvolněny a byla umožněna jejich rotace dle osy z.



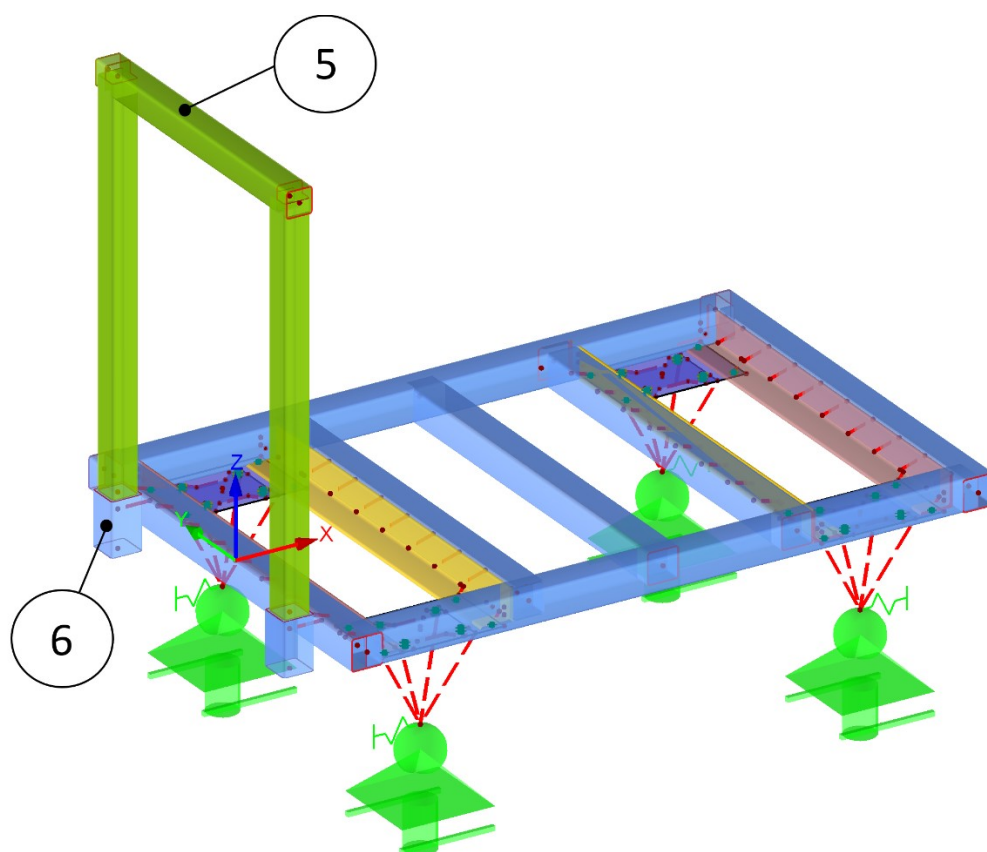
Obr. 6.7 – Tvar plochy konzoly a uzlové uvolnění

Na spojnici tuhých prutů jsou kloubové vazby (Obr. 6.8), které mají uvolněn posuv ve směru osy x, je zde přidána možnost rotace okolo osy z, protože se modeluje místo kontaktu kola s podlahou. Přidané tuhosti vazeb, který činí 0,005 N/m.



Obr. 6.8 – Model pojezdových kol testovacího zařízení v RFEMu

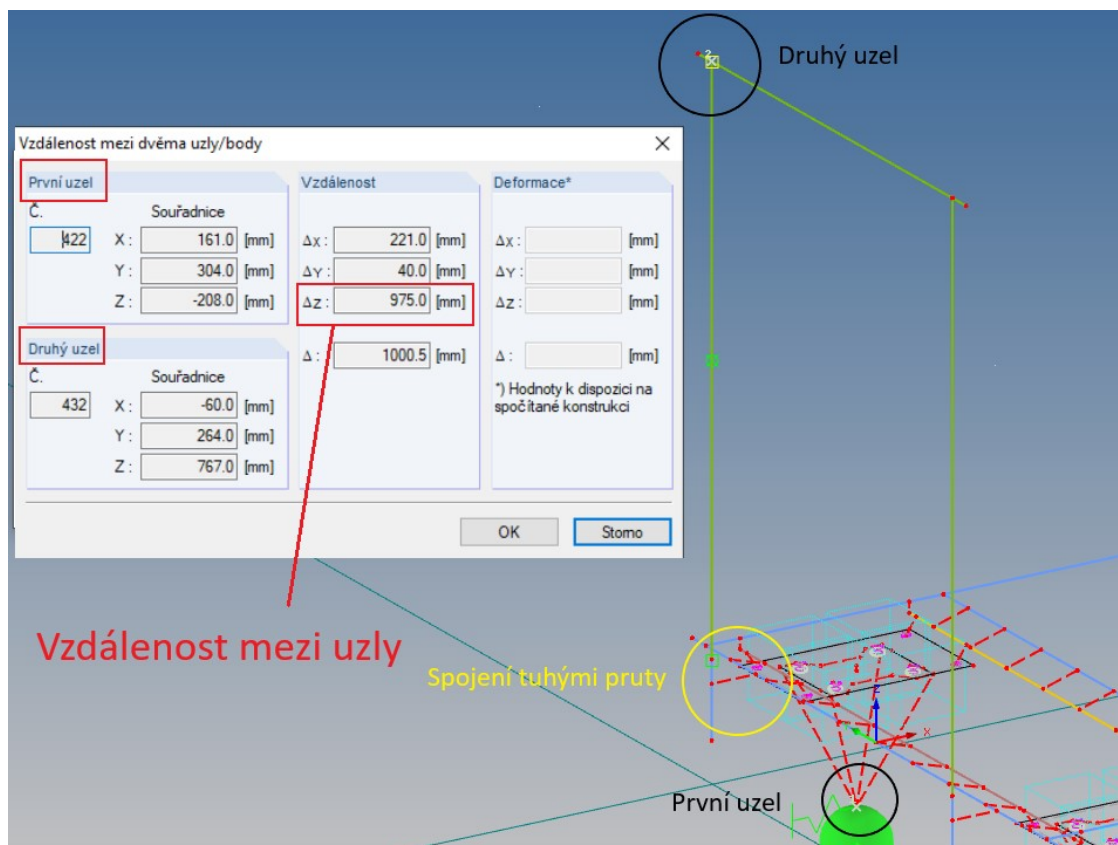
Madlo (duté profily zelené barvy) je modelováno z prutů EN 10219 [10], viz (Obr. 6.9) pozice (5).



Obr. 6.9 – Zobrazení madla a krátkých dutých profilů

Krátké pruty (modré barvy) pozice (6) jsou k rámu připevněny pomocí tuhých prutů a do těchto prutů se zasunuje madlo (zelené barvy) pozice (5), viz (Obr. 6.9).

Vodorovný prut madla, na který bude působit tlačná síla obsluhy v ose x je ve výšce 975 mm od styku běhounu kolečka s povrchem (Obr. 6.10). To však bude záležet, na tom jaký typ kol bude používám.



Obr. 6.10 – Celková výška a spojení s rámem

6.3. Parametry výpočtu

Parametry výpočtu jsou následující. Jednotlivé rozměry testovacího zařízení dle příloh A, B a C. Hmotnost břemene, která činí 1500 kg, samotná hmotnost testovacího zařízení dle přílohy A. Směr posuvu dle osy x. Počítám s tím, že všechny profily jsou z materiálu S235JRH, takže mez kluzu je 235 MPa dle [4].

6.3.1. Zatížení vlastní tíhou

Prvním zatížením je vlastní tíha konstrukce od gravitace. V tomto zatížení napěťové špičky nejsou zřetelné. Toto zatížení uvažuji jako stálé zatížení.

6.3.2. Svislé zatížení vozíku

U svislého zatížení působí na konstrukci zatížení o hmotnosti 1500 kg. Následně použijeme spojitě zatížení po délkách hlavního profilu testovacího zařízení viz (Obr. 6.11).

Výpočet celkové délky úseček styčné oblasti:

$$n = c \cdot 2 + e \cdot 2 + f \cdot 3 =$$

$$= 808 \cdot 2 + 1148 \cdot 2 + 748 \cdot 3 = 6156 \text{ mm} \quad (6.1)$$

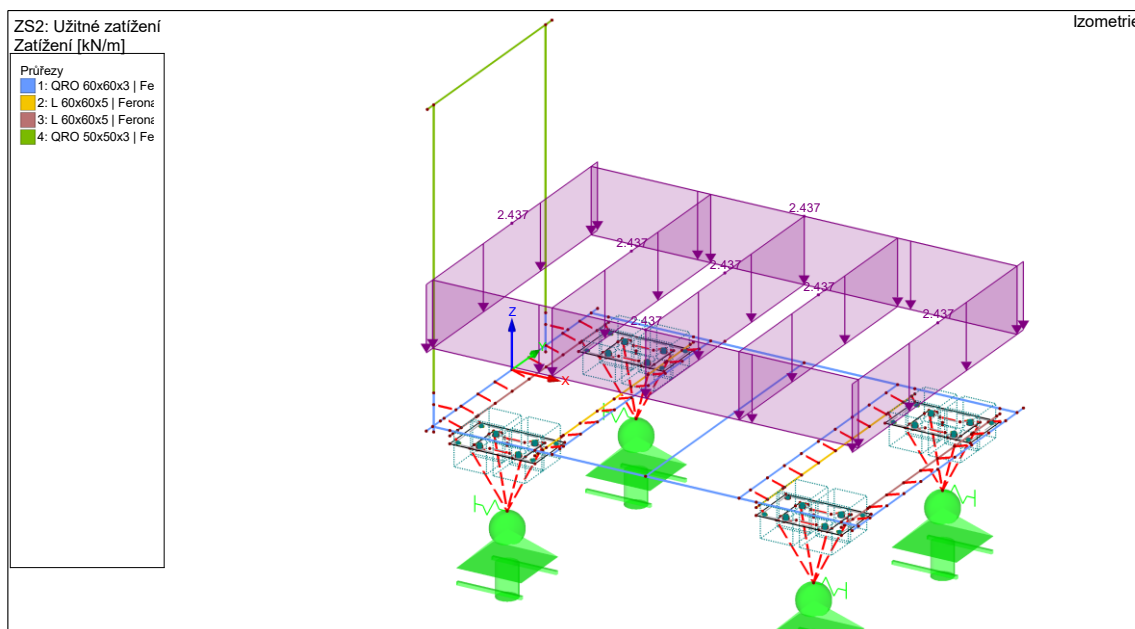
Výpočet zatěžující síly:

$$G = m \cdot g = 1500 \cdot 10 = 15000 \text{ N} \quad (6.2)$$

Výpočet spojitého zatížení (je potřeba převést na [kN] a [m]):

$$Q_{kz} = \frac{G}{n} = \frac{15}{6,156} = 2,4366 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.3)$$

Ted' jsem toto spojité zatížení z rovnice (6.3) zadal do numerického modelu (Obr. 6.11).



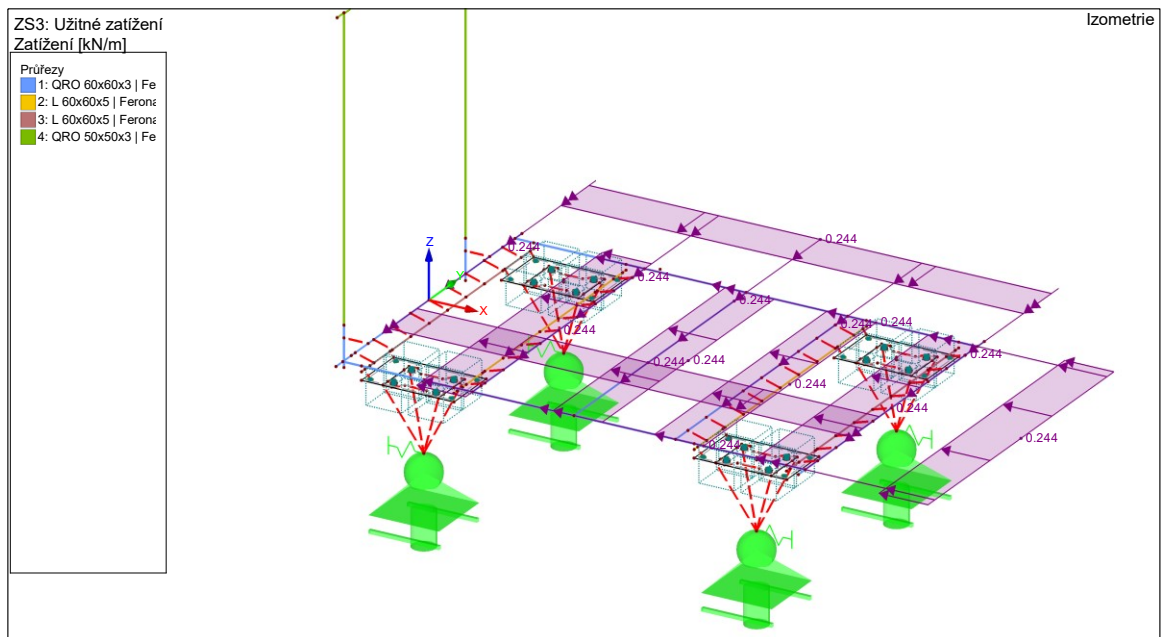
Obr. 6.11 – Definice spojitého zatížení v modelu

6.3.3. Vodorovné složky zatížení ve směru os x a y

Vodorovné složky zatížení působí proti směru kladného působení ve směru os x a y. Zadáváme spojité zatížení z rovnice (6.3), 10 % zatížení se zavádí proto, aby byl vozík zatížen tak, jak by mohl být zatížen v realitě silovým působením obsluhy. Také lze říct, že zatížením 10% ve vodorovném směru nahrazujeme, možné imperfekce (geometrické nedokonalosti reálné konstrukce) ve výpočtu.

$$Q_{kxy} = \frac{10 \cdot Q_{kz}}{100} = \frac{10 \cdot 2,4366}{100} = 0,24366 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.4)$$

Toto zatížení z rovnice (6.4) jsem vložil na stejné pruty jako u svislého zatížení (Obr. 6.12).



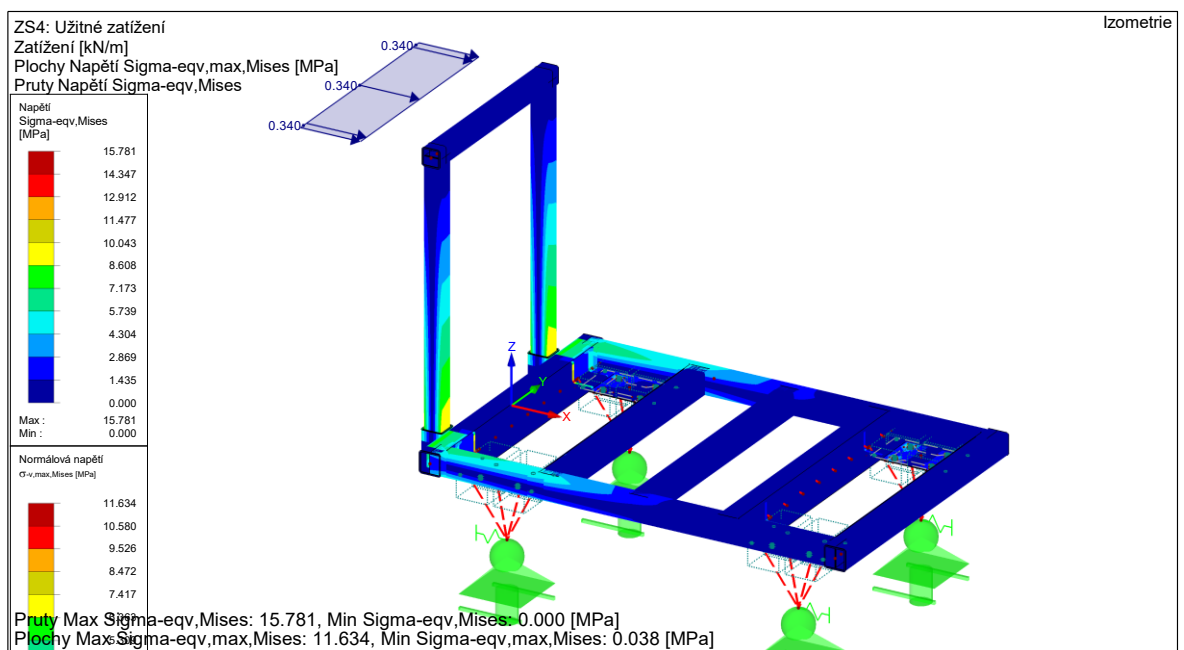
Obr. 6.12 – Vodorovné zátížení ve směru os x a y

6.3.4. Vodorovné zátížení ve směru osy x na madlo

V případě tohoto zátížení potřebuji uvést sílu člověka [3], protože uvedené zátížení bude působit po celé délce d . Délka prutu pro výpočet velikosti zátížení je $d = 588$ mm.

$$Q_{kx} = \frac{F_{cl}}{d} = \frac{0,2}{0,588} = 0,3401 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.5)$$

Toto zátížení z rovnice (6.5) jsem vložil na prut madla do kterého se bude tlačit (Obr. 6.13).



Obr. 6.13 – Vodorovné zátížení ve směru osy x na madlo

6.3.5. Režimy zatížení

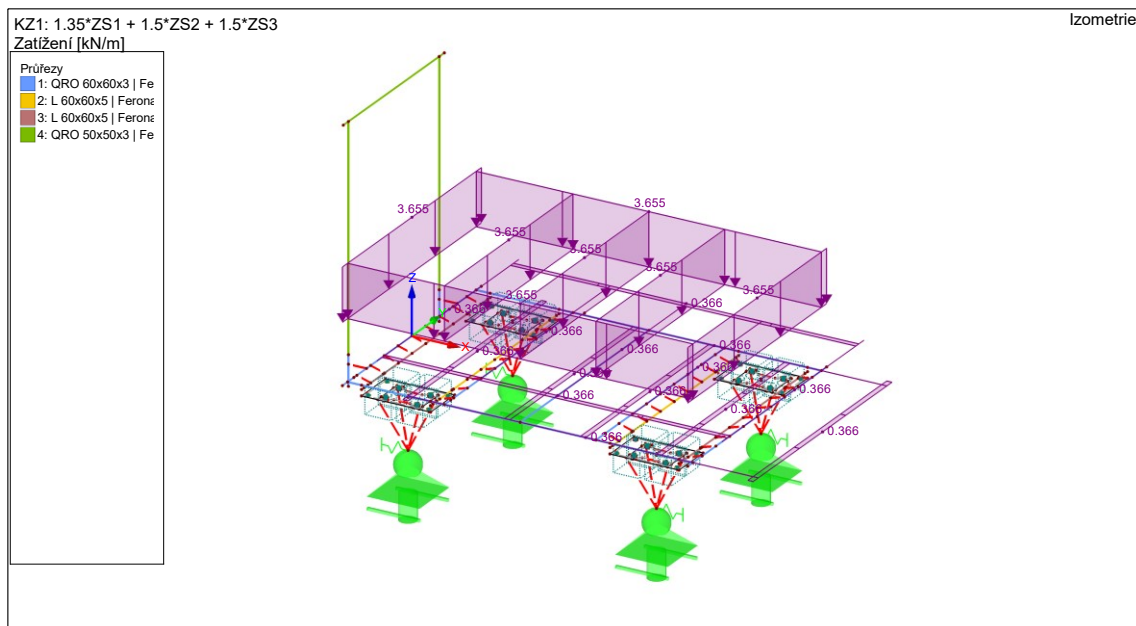
Nyní provedu kombinace režimů zatížení, přičemž každý režim bude dvakrát, protože počítám režimy se součiniteli zatížení a bez součiniteli zatížení. Tyto součinitele беру z eurokódu [5]. Zaprvé se součiniteli zatížení pro navrhované zatížení a pevnostní kontrolu. Zadruhé bez součinitelů zatížení pro charakteristické zatížení a kontrolu deformací. Do kombinace započítám součinitele zatížení, buď pro stálá nebo pro proměnná zatížení. V tabulce 8 jsou uvedeny kombinace typů zatížení, které mohou působit na konstrukci v jednotlivých režimech zatížení.

Tabulka 8 – Typy zatížení působící v jednotlivých režimech zatížení

	Zatížení vlastní tíhou	Svislé zatížení vozíku	Vodorovné složky zatížení ve směru os x a y	Vodorovné zatížení ve směru osy x na madlo
Režim při stání vozíku	✓	✓	✓	✗
Režim rozjezdu vozíku	✓	✓	✗	✓
Režim dojezdu vozíku	✓	✓	✗	✗

6.3.5.1. Režim při stání vozíku

Tento režim obsahuje kombinace vlastní tíhy, svislého zatížení na vozík a vodorovného zatížení ve směru os x a y (Obr. 6.14). Vlastní tíha obsahuje součinitel zatížení pro stálé zatížení dle [5]. Svislá a vodorovná zatížení obsahují součinitele zatížení pro proměnné zatížení dle [5].

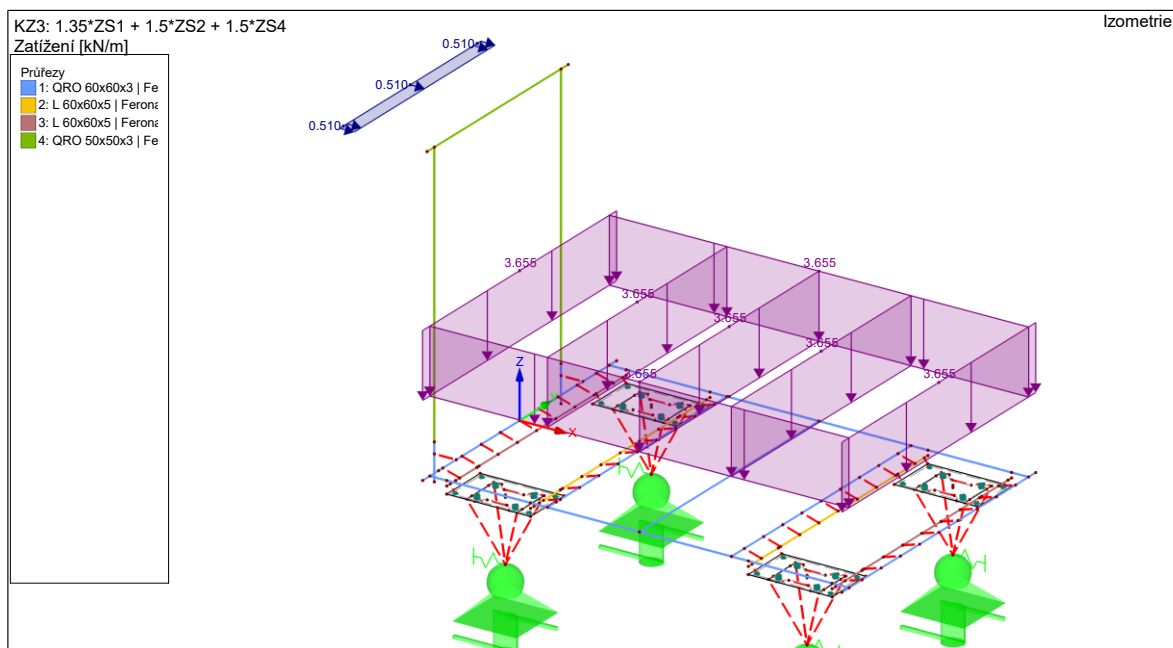


Obr. 6.14 – Režim při stání vozíku se součiniteli zatížení

Hodnoty bez součinitelů zatížení při stání vozíku se liší o součinitele zatížení, které jsou 1,35 a 1,5 [5].

6.3.5.2. Režim rozjezdu vozíku

Tento režim obsahuje kombinace vlastní tíhy, svislého zatížení na vozík a vodorovného zatížení ve směru osy x na madlo (Obr. 6.15). Popis operace: vozík je tlačén silou, dojde k rozjezdu vozíku, na který působí zatížení z rovnice (6.3) se součinitelem zatížení, dle určité vzdálenosti poté je uvolněn. Vlastní tíha obsahuje součinitele zatížení pro stálé zatížení dle [5]. Svislá a vodorovná zatížení obsahují součinitele zatížení pro proměnné zatížení dle [5].

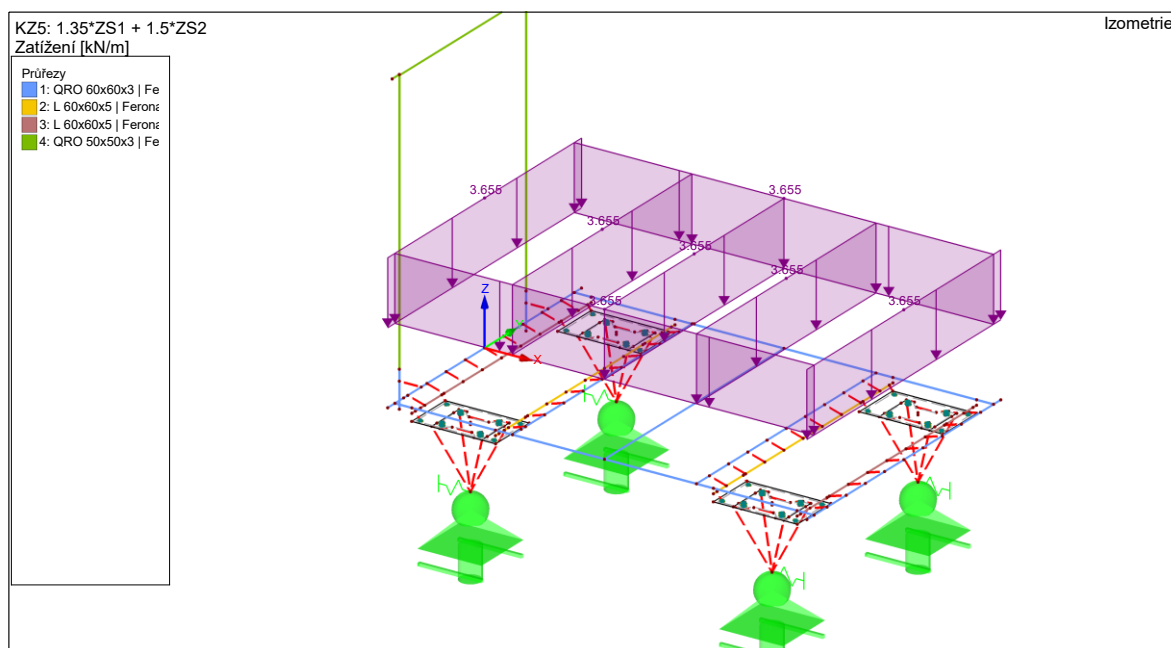


Obr. 6.15 - Režim pro rozjezd vozíku se součiniteli zatížení

Hodnoty bez součinitelů zatížení při rozjezdu vozíku se liší o součinitele zatížení, které jsou 1,35 a 1,5 [5].

6.3.5.3. Režim dojezdu vozíku

Tento režim obsahuje kombinaci vlastní tíhy a svislého zatížení na vozík (Obr. 6.16). Tento režim započíná přesně potom, co se vozík přestane tlačit a nechá se volně dojet zatížen jenom se součinitelem zatížení. Vlastní tíha obsahuje součinitele zatížení pro stálé zatížení dle [5]. Svislé zatížení obsahuje součinitele zatížení pro proměnné zatížení dle [5].



Obr. 6.16 - Režim pro dojezdu vozíku se součiniteli zatížení

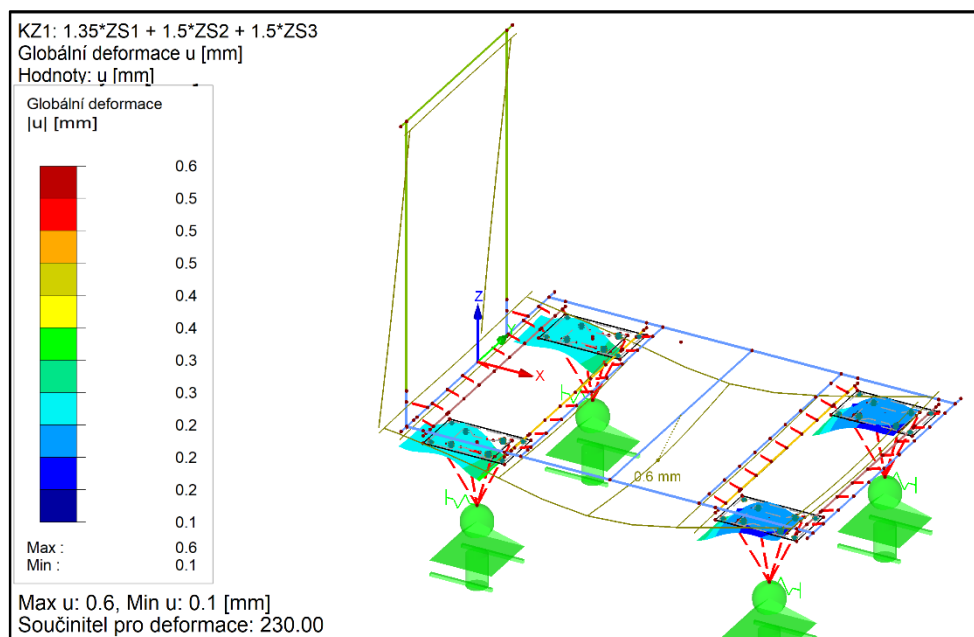
Hodnoty bez součinitelů zatížení při dojezdu vozíku se liší o součinitele zatížení, které jsou 1,35 a 1,5 [5].

6.4. Výsledky

Dalším krokem bylo nastavení samotného výpočtu. Počínaje vygenerování sítě prvků a případným, již zmíněným zahuštěním sítě prvků na přechodech s tuhými plochami. Poté samotným nastavením většího počtu iterací, to má význam u výpočtů, kde jsou různé nelinearity (uvolnění, atd.). To má za důsledek delší dobu, za kterou se výpočet vyřeší.

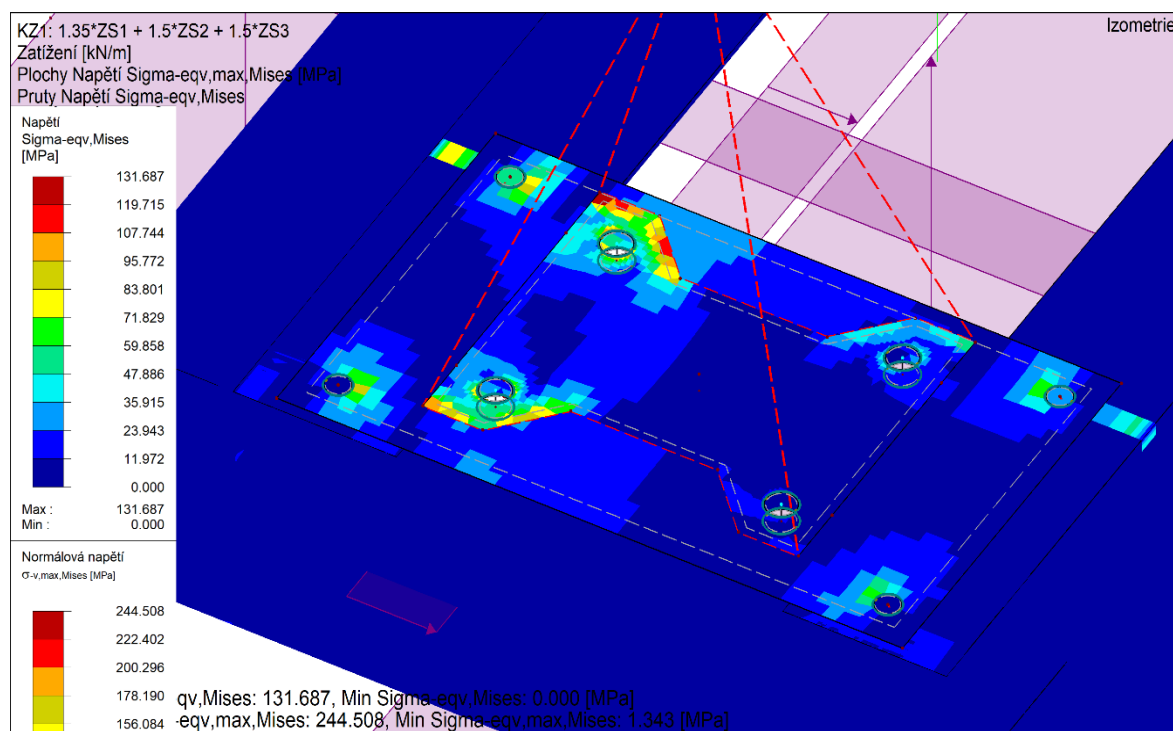
6.4.1. Výsledky pro režim při stání vozíku

Maximální deformace při tomto režimu zatížení je 0,6 mm (Obr. 6.17), u režimu bez součinitele zatížení je maximální hodnota 0,4 mm.



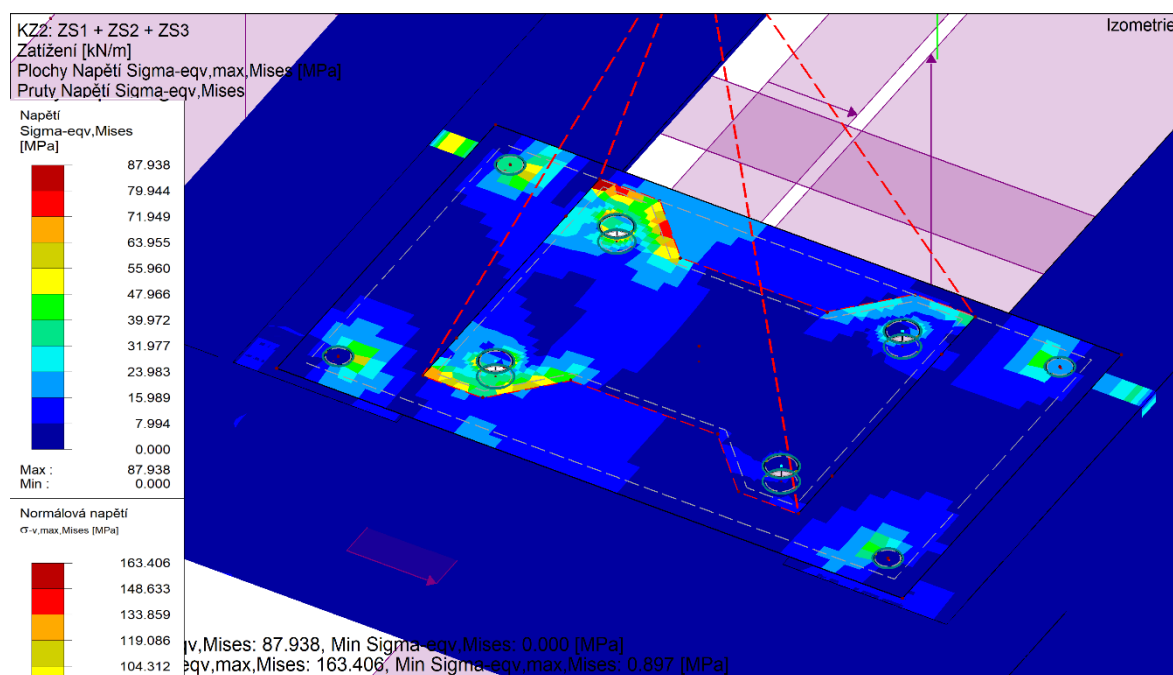
Obr. 6.17 – Deformace při stání vozíku se součiniteli zatížení

Pro posouzení přímo režim stání vozíku se součiniteli zatížení jsou výsledky vidět na (Obr. 6.18), maximální napětí je 131,7 MPa, které nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Dále na (Obr. 6.18) vidíme stupnici pro plochy, kde maximální hodnota přesáhla mez kluzu přibližně o 10 MPa, to je však přijatelné, protože tyto napěťové špičky se vyskytují na ploše konzoly kolečka, které má danou tloušťku 4 mm od výrobce. Celkově pevností kontrola vyhovuje dle tabulky 9, která obsahuje součinitele bezpečnosti.



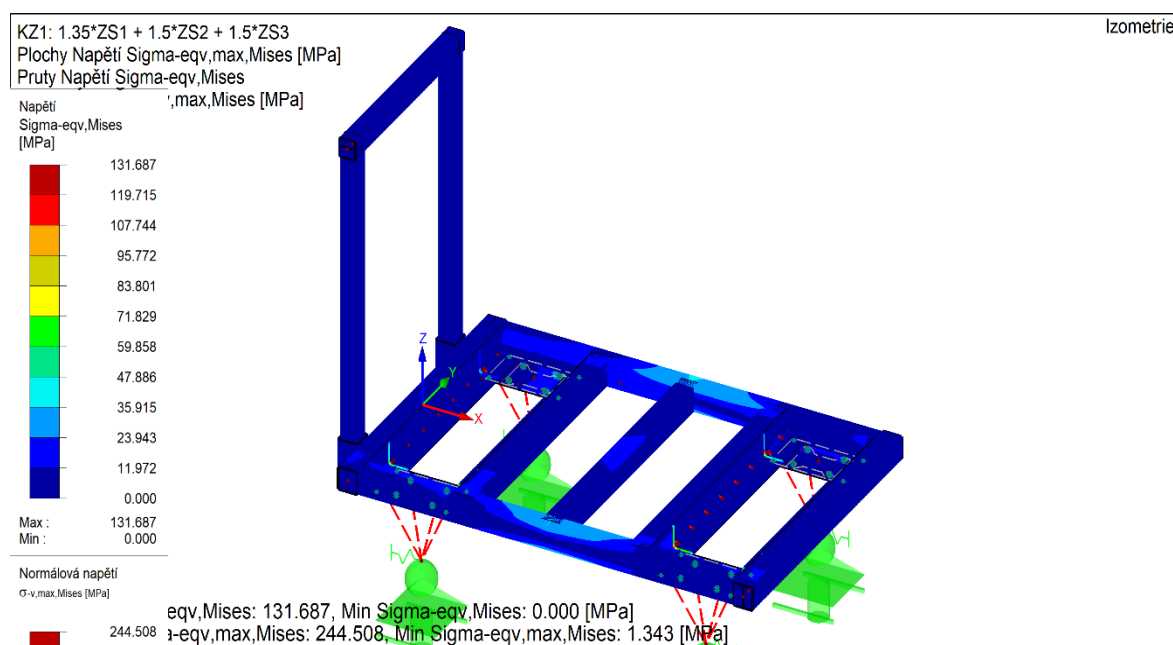
Obr. 6.18 – Napětí při stání vozíku se součiniteli zatížení

Ekvivalentní napětí pro režim při stání vozíku bez součinitelů zatížení je na (Obr. 6.19), kde vidím, že na stupnicích pro pruty a plochy maximální napětí nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Celkově režim při stání vozíku vyhovuje dle tabulky 9, která obsahuje součinitele bezpečnosti.



Obr. 6.19 - Napětí při stání vozíku bez součiniteli zatížení

Celkový náhled výsledků pevnostní analýzy na vozík (Obr. 6.20), režimu při stání vozíku.



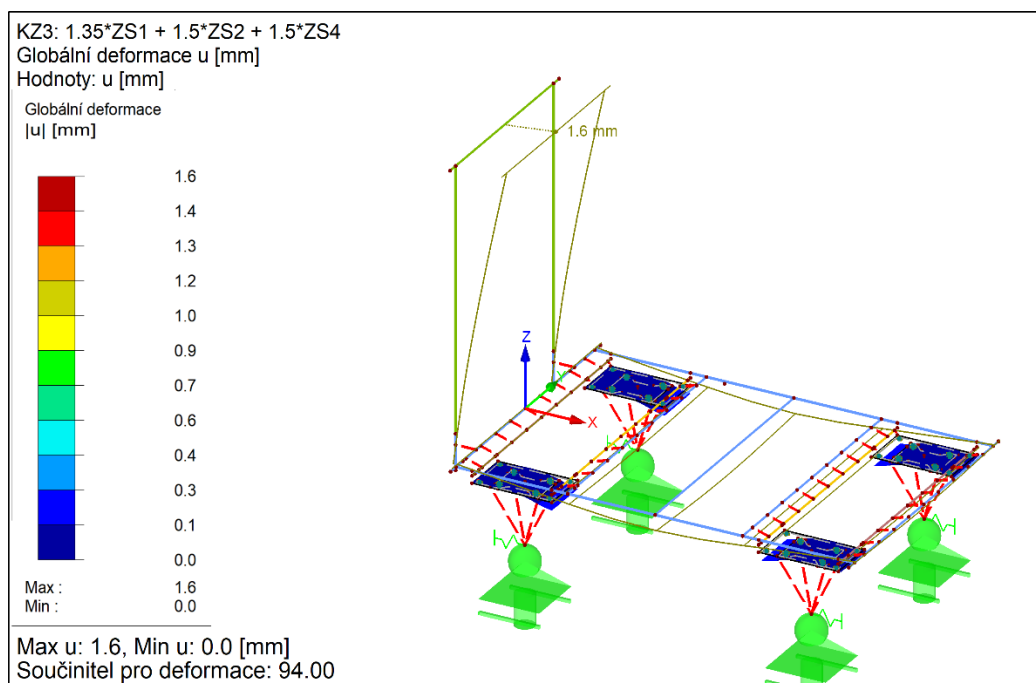
Obr. 6.20 - Napětí při stání vozíku pohled na celý vozík

Tabulka 9 – Součinitele bezpečnosti pro jednotlivé napětí při stání vozíku

	Napětí při stání vozíku se součiniteli zatížení	Napětí při stání vozíku bez součiniteli zatížení
Součinitel bezpečnosti pro pruty	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{131,7} = 1,78$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{87,9} = 2,67$
Součinitel bezpečnosti pro plochy	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{244,5} = 0,96$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{163,4} = 1,44$

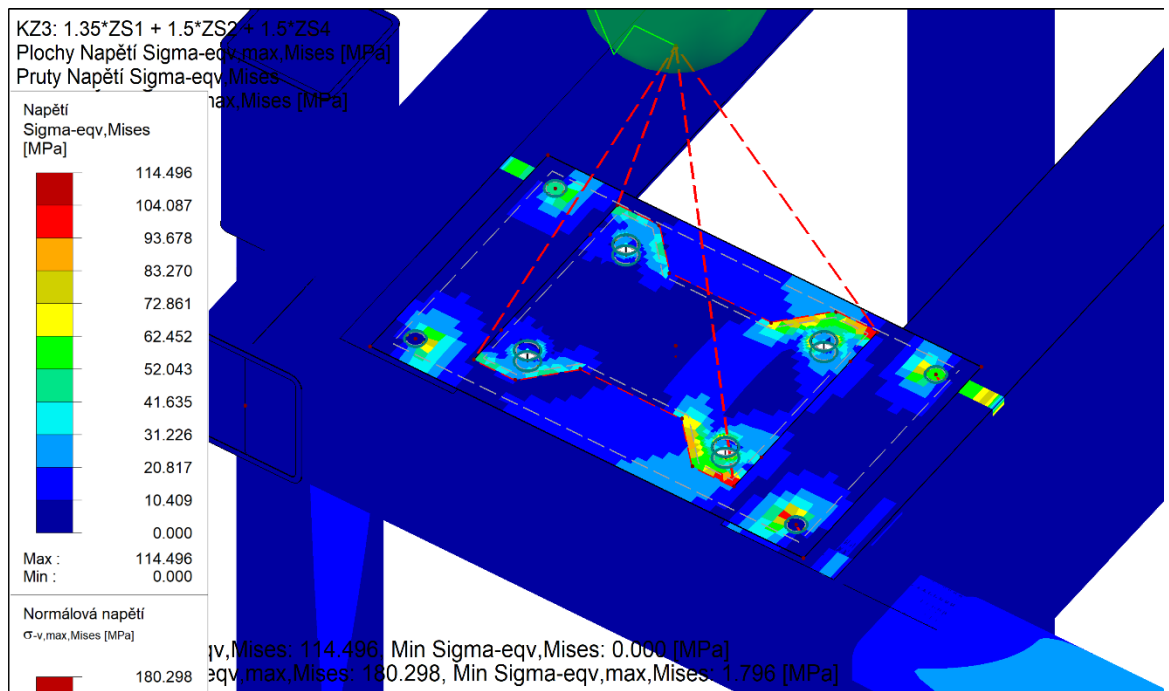
6.4.2. Výsledky pro režim rozjezdu vozíku

Tento režim zatížení má maximální deformaci 1,6 mm, která je dána tlačnou silou na madlo (Obr. 6.21), maximální deformace režimu bez součinitele zatížení je 1,1 mm.



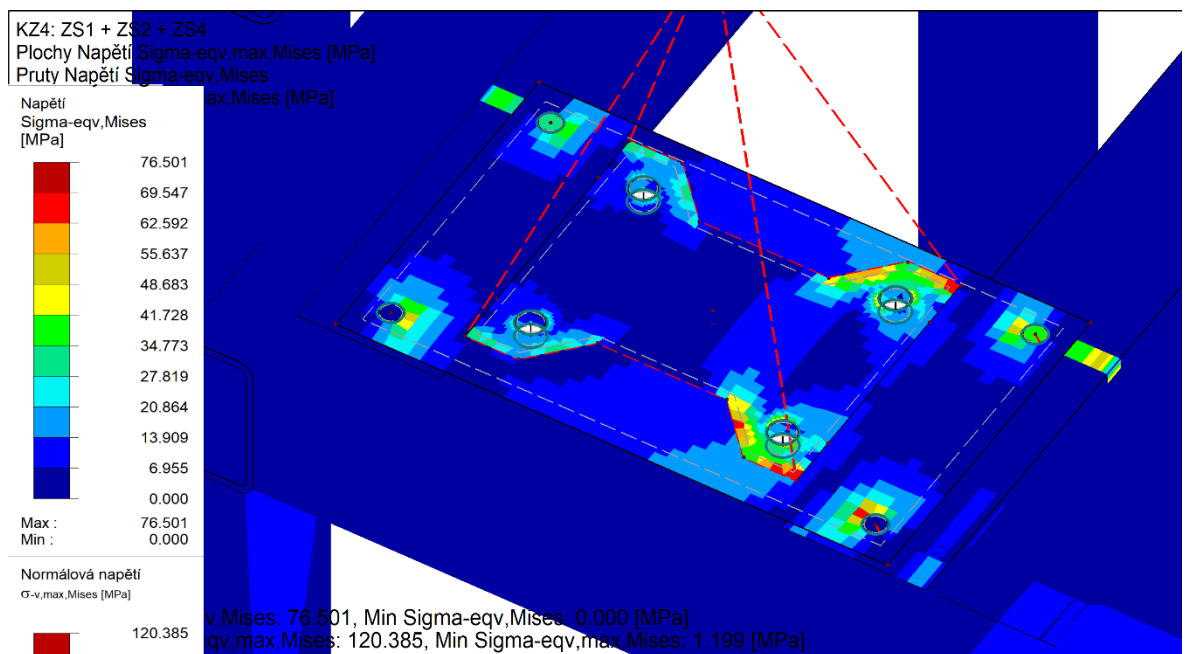
Obr. 6.21 – Deformace konstrukce při rozjezdu vozíku se součiniteli zatížení

Pro režim rozjezdu vozíku se součiniteli zatížení jsou výsledky vidět na (Obr. 6.22), kde se na prutech nachází maximální napětí 114,5 MPa, které nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Dále je vidět stupnice pro plochy viz (Obr. 6.22), kde maximální hodnota také nepřesáhla mez kluzu, ale na ploše konzoly kolečka jsou stále vidět napěťové špičky. Pevností kontrola pro tento režim vyhovuje dle tabulky 10, která obsahuje součinitele bezpečnosti.



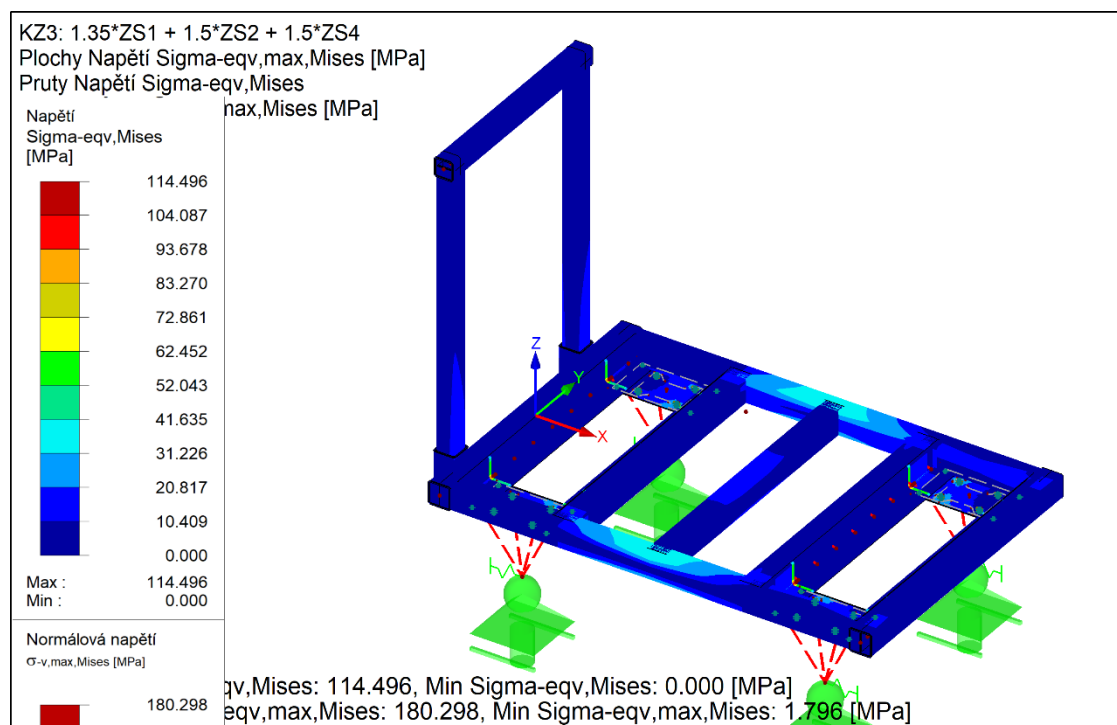
Obr. 6.22 – Napětí při rozjezdu vozíku se součiniteli zatížení

Na (Obr. 6.23) pro režim rozjezdu bez součinitelů zatížení vidím, že na stupnicích pro pruty a plochy maximální napětí nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Pevností kontrola pro tento režim vyhovuje dle tabulky 10 obsahující součinitele bezpečnosti.



Obr. 6.23 - Napětí při rozjezdu vozíku bez součiniteli zatížení

Celkový náhled výsledků pevnostní analýzy na vozík (Obr. 6.24), pro režim rozjezdu.



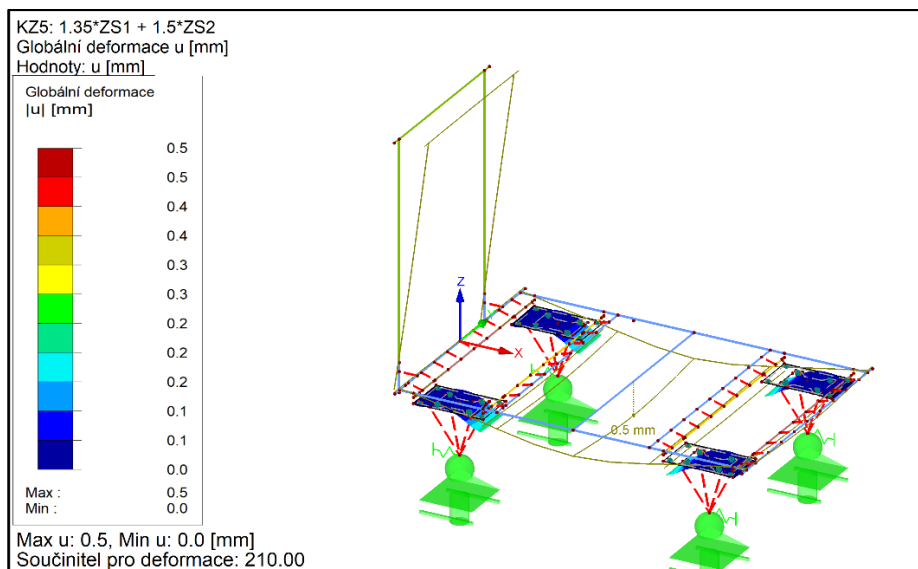
Obr. 6.24 - Napětí při rozjezdu pohled na celý vozík

Tabulka 10 – Součinitele bezpečnosti pro jednotlivé napětí pro režim rozjezdu vozíku

	Napětí při rozjezdu vozíku se součiniteli zatížení	Napětí při rozjezdu vozíku bez součiniteli zatížení
Součinitel bezpečnosti pro pruty	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{114,5} = 2,05$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{76,5} = 3,07$
Součinitel bezpečnosti pro plochy	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{180,3} = 1,3$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{120,4} = 1,95$

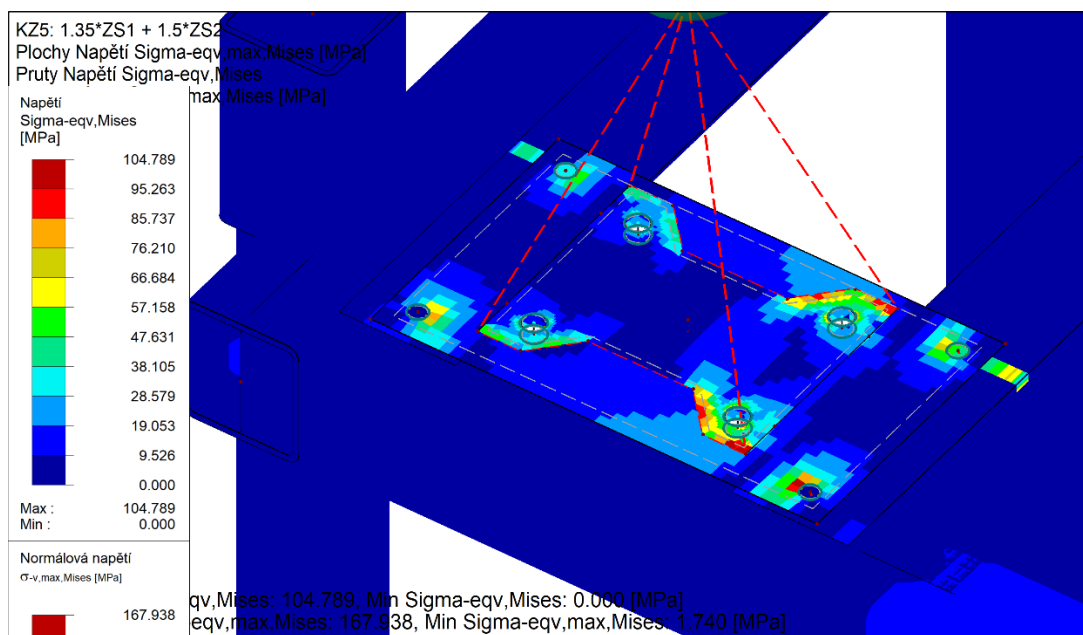
6.4.3. Výsledky pro režim dojezdu vozíku

Maximální deformace tohoto režimu je 0,5 mm, dána je zatížením vozíku bez tlačné síly (Obr. 6.25), režim bez součinitele zatížení má maximální deformaci 0,4 mm.



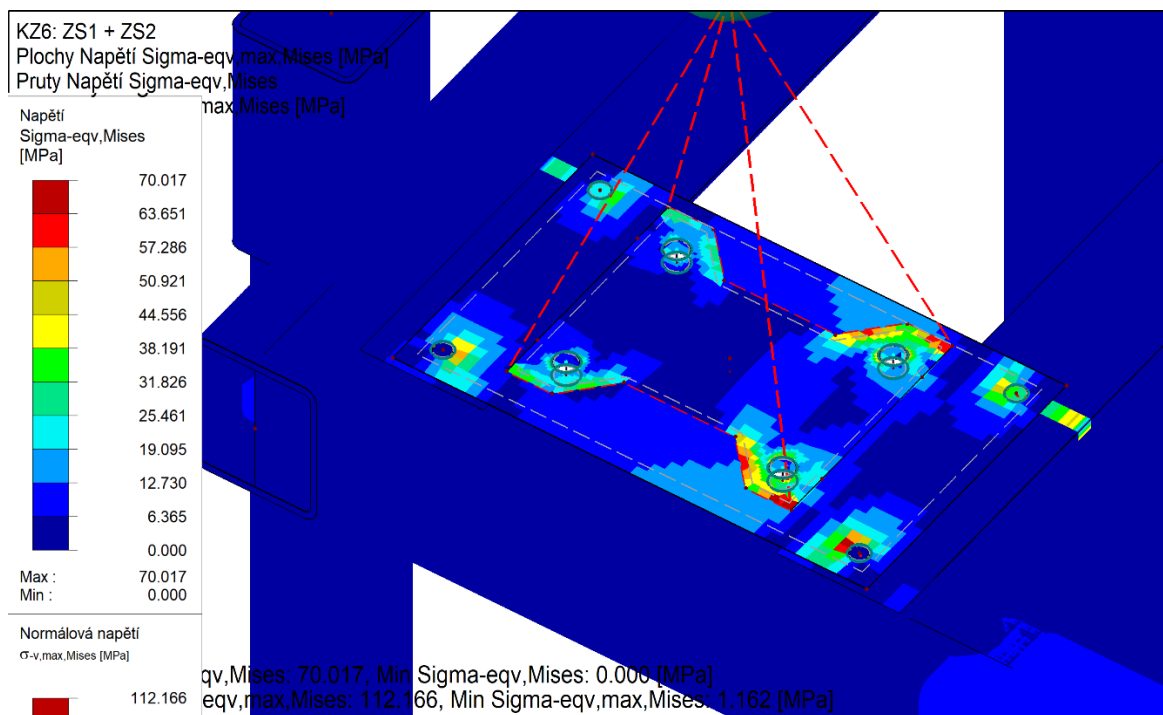
Obr. 6.25 – Deformace konstrukce při dojezdu vozíku se součiniteli zatížení

K posouzení tohoto režimu obsahující součinitele zatížení přidávám (Obr. 6.26), kde lze vidět že maximální napětí na prutech je 104,8 MPa a nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Na stejném obrázku vidíme stupnici pro plochy, kde mez kluzu taktéž nebyla přesáhnuta. Napěťové špičky vyskytující se na ploše konzoly kolečka jsou stále viditelné. Pevností kontrola u tohoto režim vyhovuje dle tabulky 11, obsahující součinitele bezpečnosti.



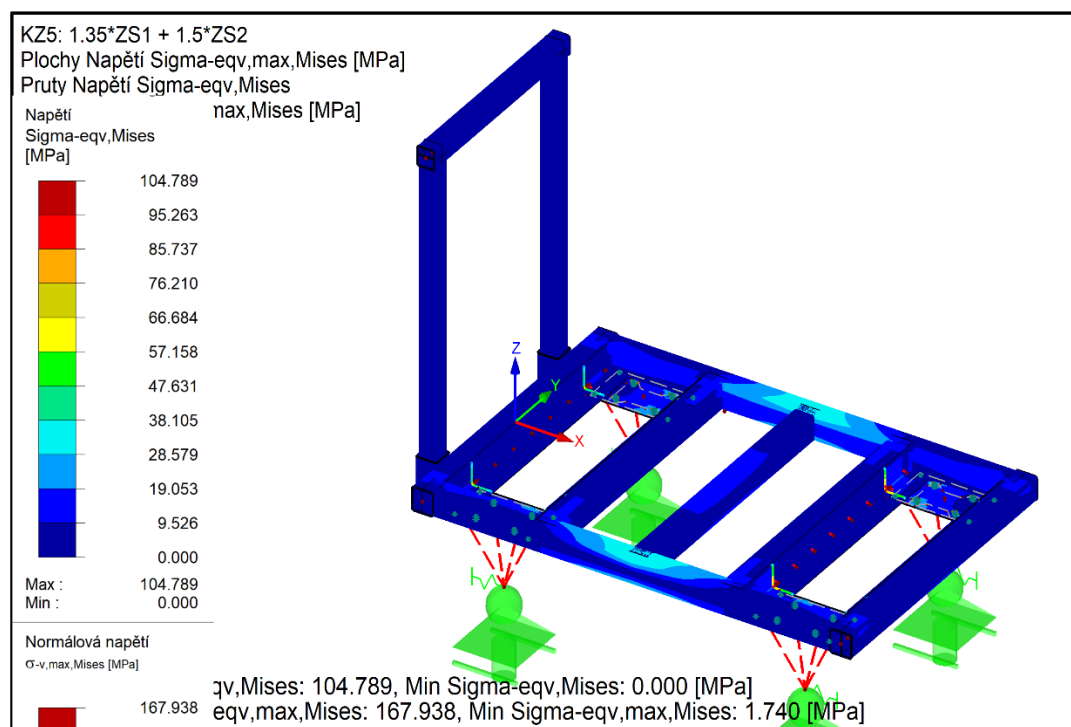
Obr. 6.26 – Napětí při dojezdu vozíku se součiniteli zatížení

Ekvivalentní napětí režimu při dojezdu vozíku bez součinitelů zatížení viz (Obr. 6.27), kde vidím že na stupnicích pro pruty a plochy maximální napětí nepřesahuje mez kluzu S235JRH [4]. Pevností kontrola tohoto režimu vyhovuje, viz tabulky 11 obsahující součinitele bezpečnosti.



Obr. 6.27 - Napětí při dojezdu vozíku bez součiniteli zatížení

Celkový náhled výsledků pevnostní analýzy na vozík (Obr. 6.28), pro režim dojezdu.



Obr. 6.28 - Napětí při dojezdu pohled na celý vozík

Tabulka 11 – Součinitele bezpečnosti pro jednotlivé napětí pro režim dojezdu vozíku

	Napětí při rozjezdu vozíku se součiniteli zatížení	Napětí při rozjezdu vozíku bez součiniteli zatížení
Součinitel bezpečnosti pro pruty	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{104,8} = 2,24$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{70} = 3,36$
Součinitel bezpečnosti pro plochy	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{167,9} = 1,4$	$k = \frac{R_e}{\sigma_{max}} = \frac{235}{112,2} = 2,1$

Ze všech výsledků pevnostních analýz vyplývá, že navrhnutá sestava vozíku pevnostně vyhovuje.

7. Závěr

Účelem bakalářské práce byl návrh testovacího zařízení. Za tímto účelem byl zpracován přehled průmyslových kol od výrobců TENTE a Blickle používaný ve firmě SSI Schäfer, s.r.o. a jejich technických informací. Dále jsem navrhnul tři různé metodiky měření valivého odporu, kdy jsem vybral dojezdovou zkoušku, která nejlépe vyhovuje stanoveným kritériím.

Zařízení disponuje rozměry, na než lze položit europaletu, s pomocí které lze zařízení zatěžovat. Jako břemeno lze použít pytle s pískem pro snadné rozložení a nastavení váhy. Konstrukce obsahuje odnímatelné madlo pro snadné uskladnění a součástí zařízení jsou vyměnitelné plechy, na kterých jsou upevněny konzoly kol pomocí šroubového spoje. Metodika vyhodnocování valivého odporu je zhotovena na základě vybraného měřicího zařízení a díky zapůjčenému simulačnímu modelu pro početní určení valivých odporů pojezdových kol průmyslových vozíků od firmy SSI Schäfer, s.r.o. Pevnostní kontrolu měřicího zařízení jsem provedl v programu RFEM od společnosti Dlubal Software s.r.o. Z výsledků pevnostní kontroly je zřejmé, že testovací zařízení vydrží, jak hmotnost břemene v klidu, tak i pro dané režimy zatížení. Výrobní dokumentace byla zpracována v plném rozsahu, což znamená že jsou zhotoveny sestavné výkresy a výkresy všech jednotlivých dílů.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat za přínosné informace ke zhotovení bakalářské práce panu Ing. Miroslavovi Trochtovi, Ph.D. vedoucímu bakalářské práce a také panu Ing. Jiřímu Vepřekovi, Ph.D. konzultantovi z firmy SSI Schäfer, s.r.o. za použitelné informace z praxe a osobním poznatkům.

8. Seznam použité literatury

- [1] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 5. upr. vyd. Úvaly: Albra, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [2] VEPŘEK, J.: *Simulační model pro početní určení valivých odporů pojezdových kol průmyslových vozíků*. Hranice: SSI Schäfer s.r.o., 2020
- [3] Kaláb K.: *Části a mechanismy strojů – Teorie + Projekty. Kompletní studijní materiál - Interaktivní multimediální PDF*, 2016, 411 stránek. Dostupný v E-learning systému.
<https://lms.vsb.cz>
- [4] Mechanické vlastnosti S235JRH. *Ferona* [online]. Praha [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/trubky1-S355J2H.pdf>
- [5] Zatížení stavebních konstrukcí. *Zatížení stavebních konstrukcí* [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B\)%20TEORIE/Uvod.pdf](http://fast10.vsb.cz/zatizeni/B)%20TEORIE/Uvod.pdf)
- [6] Produktový katalog TENTE. *TENTE* [online]. Sudoměřice [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: https://products.tente.com/cz-cz/products?_ga=2.244352194.630431667.1581330269-1313513253.1581330269
- [7] Produktový katalog Blickle. *Blickle* [online]. Brno [cit. 2019-11-10]. Dostupné z: http://catalogue.blickle.cz/?_ga=2.158950458.1683872287.1581435715-473474653.1581435715
- [8] Valivý odpor. *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA) [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Valiv%C3%BD_odpor
- [9] Europaleta. *Wikipedia* [online]. San Francisco (CA) [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Europaleta>
- [10] Ferona online katalog. *Ferona* [online]. Praha [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/>
- [11] *Optimalizace metodou Monte Carlo* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-05-07]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/rzfz8/BP_OptimalizaceMonteCarlo.pdf. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Ústav matematiky a statistiky.

9. Seznam příloh

Příloha	Název	Označení	Formát
A	Měřicí přípravek	KRC0066-00.00	A2
B	Svařenec rámu	KRC0066-00.01	A1
C	Svařenec madla	KRC0066-00.02	A3
D	Podložka	KRC0066-00.03	A4
E	Dlouhý profil	KRC0066-00.01.00	A4
F	Krátký profil	KRC0066-00.01.01	A4
G	Výztuha	KRC0066-00.01.02	A4
H	L-Profil	KRC0066-00.01.03	A3
CH	Doraz	KRC0066-00.01.04	A4
I	Pouzdro	KRC0066-00.01.05	A4
J	Bočnice madla	KRC0066-00.02.00	A4
K	Držák madla	KRC0066-00.02.01	A4